



**Politecnico
di Torino**

Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Gestionale

Tesi di Laurea Magistrale

Approccio data-driven per la manutenzione predittiva nella saldatura a punti

Relatori:

Prof.ssa Giulia Bruno
Prof.ssa Manuela De Maddis
Dott. Luigi Panza

Candidato

Fabio de Blasio di Palizzi

Matricola

279836

Anno accademico 2022/2023
Sessione di Laurea 10/2022

Indice

1. Industria 4.0	5
1.1 Cosa si intende per industria 4.0	5
1.2 Vantaggi e ragioni del successo	6
1.3 Nuove Tecnologie.....	7
1.4 Sviluppi futuri.....	11
1.5 Manutenzione Predittiva	13
2. Processo di saldatura	17
2.1 Cosa si Intende per processo di saldatura	17
2.2 Tipologie di processi di saldatura	18
2.3 Processo di saldatura a punti	21
2.4 Problema di usura dell'elettrodo	28
3. Campagna sperimentale	32
3.1 Scopo della campagna sperimentale	32
3.2 Preparazione materiale per l'esperimento	34
3.3 Esecuzione dell'esperimento	36
3.4 Test carta carbone.....	38
3.5 Prova di trazione	40
4. Misurazione dell'usura	42
4.1 Metodologia di misurazione	42
4.2 Caratteristiche misurate	44
4.3 Analisi delle caratteristiche misurate	46
5. Ricerca di un KPI	53
5.1 Cosa si intende per KPI	53
5.2 Stato dell'arte	54
5.2 Ricerca di un nuovo indicatore di usura e risultato intermedio.....	55
5.3 Indicatore finale	60
5.4 Assunzioni.....	64
6. Conclusioni	66
Bibliografia	67

Indice delle figure

Figura 1- Tipologia di saldature [6]	18
Figura 2 – Terminologia [6]	19
Figura 3 - Saldatura a rulli [9].....	20
Figura 4 - saldatura per scintillio [10]	21
Figura 5 - saldatrice a punti	21
Figura 6 - schematizzazione del processo di saldatura a punti [3]	24
Figura 7 - effetto shunting [1]	26
Figura 8 - ciclo di processo [3]	27
Figura 9 - elettrodo	28
Figura 10 - deformazione faccia dell'elettrodo [1]	30
Figura 11 - saldatrice con sistema di sensori collegato	32
Figura 12 - forma dell'elettrodo usato durante la sperimentazione [2].....	33
Figura 13 - esempio di lastra metallica	34
Figura 14 - misure della lastra metallica usata nell'esperimento [2]	35
Figura 15 – misure dei campioni per lo shear test [2]	35
Figura 16 – schematizzazione del ciclo di saldatura usato nelle prove sperimentali [2]	36
Figura 17 - provino per lo shear test.....	37
Figura 18 - sensori collegati alla saldatrice [2].....	38
Figura 19 - schematizzazione della misurazione tramite carta carbone [3]	39
Figura 20 - impronte della faccia dell'elettrodo [2]	40
Figura 21 - schema dello shear test [3].....	40
Figura 22 – esempio di dati raccolti tramite Matlab	43
Figura 23 – Esempio di dati elaborati dopo essere stati esportati da Matlab.....	44
Figura 24 - grafico dell'area di contatto rispetto al numero di saldature	46
Figura 25 - grafico della filled area rispetto al numero di saldature	47
Figura 26 - grafico della convex area rispetto al numero di saldature	47
Figura 27 - grafico dell'asse maggiore rispetto al numero di saldature	48
Figura 28 - grafico dell'asse minore rispetto al numero di saldature.....	49
Figura 29 - grafico del diametro rispetto al numero di saldature	49
Figura 30 - grafico della circularity rispetto al numero di saldature	50
Figura 31 - grafico del failure Load rispetto alla contact area	51
Figura 32 - grafico del Failure Load rispetto al numero di saldature	52
Figura 33 -esempio di tabella di misurazioni normalizzate	57
Figura 34 - matrice di correlazione	57
Figura 35 - indice di correlazione tra Failure Load e media pesata di eccentricity e circularity	59
Figura 36 - grafico del Failure Load rispetto alla media pesata di eccentricity e circularity	60
Figura 37 - correlazione tra Failure Load e indicatore finale	62
Figura 38 - grafico dell'andamento dell'indicatore finale rispetto al numero di saldature	63
Figura 39 - grafico del Failure Load rispetto all'indicatore finale	63
Figura 40 - correlazione tra il KPI e il Failure Load (calcolato facendo la media delle 3 ripetizioni successive)	65

SOMMARIO

Questo elaborato parte da una prima ma fondamentale introduzione sull'Industria 4.0 e sulle sue infinite potenzialità per poi andare a concentrarsi in particolare su uno dei suoi punti cardine che è quello dei sistemi informativi integrati con i processi e più nello specifico nella manutenzione predittiva. Quest'ultima resa possibile solo grazie alla raccolta e all'elaborazione dei dati raccolti dai sistemi informativi.

Come si può dedurre dal titolo della Tesi la Manutenzione predittiva in questo caso viene applicata ad un processo molto diffuso nel settore produttivo (e in particolare in quello dell'automotive) che è quello della saldatura a punti. Da qui allora si è proceduto a una presentazione delle varie metodologie di saldatura concentrandosi poi sui pregi e difetti di quella a punti.

Per poter eseguire uno studio di questo tipo però è stata necessaria una lunga campagna sperimentale (minuziosamente descritta nel capitolo 3) che aveva come scopo la raccolta dei dati sui punti di saldatura. In questo elaborato la concentrazione si è volta su un particolare tipo di dato che è quello dell'impronta della faccia di contatto dell'elettrodo. Questo dato ci garantisce numerose informazioni e misurazioni che possono essere utilizzate per conoscere la qualità del giunto di saldatura.

Una volta raccolte tutte le misurazioni si è proceduto alla ricerca di un indicatore di usura che fosse correlato il più possibile alla qualità del giunto e che quindi in ottica di Industria 4.0 desse informazioni sullo stato di usura dell'elettrodo e quindi su quando operarne una sostituzione per evitare fermi macchina.

1. Industria 4.0

1.1 Cosa si intende per industria 4.0

Quando si parla di “rivoluzione industriale”, solitamente ci si riferisce ad un punto dell’evoluzione tecnologica, che, grazie ad una rivoluzionaria scoperta od applicazione, subisce un poderoso sbalzo in avanti, conseguentemente rivoluzionando il paradigma sociale e produttivo fino a quel momento diffuso e dominante.

All’interno della storia dell’umanità si possono distintamente individuare quattro rivoluzioni industriali.

La prima rivoluzione industriale avvenne nel periodo storico compreso tra il 1760 ed il 1840, e fu caratterizzata dal passaggio da una economia prettamente agricola ed artigianale ad una economia industriale, con mezzo di produzione di massa, grazie all’introduzione della macchina a vapore.

La seconda rivoluzione industriale, invece, viene collocata cronologicamente tra il 1856 ed il 1878, ed in particolare nell’ultimo decennio del 1800: la rivoluzione tecnologica di questi anni fu caratterizzata dall’utilizzo massiccio dell’energia elettrica per scopi produttivi ed industriali.

La terza rivoluzione industriale, ancora, è strettamente ricollegata all’introduzione dei grandi calcolatori, della progressiva diffusione capillare dell’uso dei computer. Essa ha inizio nel ventesimo secolo, precisamente negli anni ’70, ed ha comportato l’utilizzo dei grandi computer ai fini della massiccia automazione dei procedimenti produttivi, ed ai fini di una più rapida elaborazione dei dati e di una maggiore precisione in fase produttiva.

Infine, ai giorni d’oggi, è in atto l’ultima rivoluzione, individuata dal termine “industria 4.0” con cui ci si rivolge, genericamente, al fenomeno della c.d. quarta rivoluzione

industriale, che implica una sempre maggiore applicazione di modelli di produzione e gestione aziendali interconnessi al web.

Tale fenomeno si sostanzia nella raccolta e analisi di informazioni per attivare processi di “learning machine”, in modo da rendere più flessibile il ciclo produttivo e di migliorare l’interazione tra uomo e macchina.

1.2 Vantaggi e ragioni del successo

I principali vantaggi del fenomeno industria 4.0 si sostanziano nella disponibilità, in tempo reale, di tutte le informazioni inerenti alla produzione, con una conseguente crescita di efficienza produttiva pari al 30 – 50%.

Nel dettaglio, i principali benefici possono essere classificati come:

- **Maggiore flessibilità** attraverso la produzione di piccoli lotti ai costi della grande scala;
- **Maggiore velocità** dal prototipo alla produzione in serie attraverso tecnologie innovative;
- **Maggiore produttività** attraverso minori tempi di set-up, riduzione errori e fermi macchina;
- **Migliore qualità e minori scarti** mediante sensori che monitorano la produzione in tempo reale;
- **Maggiore competitività del prodotto** grazie a maggiori funzionalità derivanti dall’Internet delle cose.

In Italia la rivoluzione 4.0 è stata attuata prima dal Ministro Calenda, ed in seguito dal Ministro Patuanelli, con i pacchetti “Industria 4.0” e “Transizione 4.0”.

L’origine del termine “industria 4.0” viene comunemente ricondotto all’iniziativa europea “Industry 4.0”, portata avanti dai tedeschi Henning Kagermann, Wolf-Dieter

Lukas e Wolfgang Wahlster, che annunciarono un progetto di riforme ed investimenti definito “Zukunftsprojekt Industrie 4.0”.

Le ragioni del successo del modello 4.0 passano principalmente per l'estrema adattabilità dei modelli di implementazione, che sono adattabili in modo flessibile, e sono caratterizzate da un principio di “open innovation”, cioè di libera circolazione delle conoscenze e delle innovazioni, che possono essere sviluppate e migliorate anche al di fuori dell'impresa, da parte di attori esterni.

L'industria 4.0. passa per la figura della smart factory, cioè di una industria ideale e smart che si fonda su una smart production (cioè su nuove tecnologie produttive che creano sinergia tra gli elementi della produzione, cioè gli operatori e le macchine), uno smart service (cioè tutte le infrastrutture informatiche che permettono di integrare i sistemi all'interno di una azienda, oppure l'azienda stessa con strutture esterne), ed una smart energy (una gestione intelligente ed attenta dei consumi energetici, tramite sistemi più performanti e a minor impatto ambientale).

Elemento portante di industria 4.0. sono i c.d. sistemi ciberfisici, ovvero sistemi fisici che sono interconnessi con sistemi informatici e possono interagire e collaborare con altri sistemi ciberfisici.

1.3 Nuove Tecnologie

Da uno studio di Boston Consulting emerge che la quarta rivoluzione industriale si centra sull'adozione di alcune tecnologie definite abilitanti.

Le nove tecnologie abilitanti definite da Boston Consulting sono:

- *Advanced manufacturing solution*: sistemi avanzati di produzione, ovvero sistemi interconnessi e modulari che permettono flessibilità e rendimento. In queste tecnologie rientrano i sistemi di movimentazione dei materiali

automatici e la robotica avanzata, che oggi entra sul mercato con i robot collaborativi o *cobot*.

- Additive manufacturing: sistemi di produzione additiva che aumentano l'efficienza dell'uso dei materiali.
- Realtà aumentata: sistemi di visione con realtà aumentata per guidare meglio gli operatori nello svolgimento delle attività quotidiane.
- Simulazioni: simulazione tra macchine interconnesse per ottimizzare i processi.
- Integrazione orizzontale e verticale: integrazione e scambio di informazioni in orizzontale e in verticale, tra tutti gli attori del processo produttivo.
- Industrial Internet: comunicazione tra elementi della produzione, non solo all'interno dell'azienda, ma anche all'esterno, grazie all'utilizzo di internet.
- Cloud: implementazione di tutte le tecnologie *cloud*, come l'archiviazione online delle informazioni, l'uso del *cloud computing*, di servizi esterni di analisi dati, ecc. Nel *cloud* sono contemplate anche le tecniche di gestione di grandissime quantità di dati attraverso sistemi aperti.
- Sicurezza informatica: l'aumento delle interconnessioni interne ed esterne aprono la porta a tutta la tematica della sicurezza delle informazioni e dei sistemi che non devono essere alterati dall'esterno.
- Big Data Analytics: tecniche di gestione di grandissime quantità di dati attraverso sistemi aperti che permettono previsioni o predizioni.

L'Osservatorio Industria 4.0 del Politecnico di Milano fornisce un'ulteriore classificazione di sei tecnologie abilitanti, cosiddette *tecnologie intelligenti*, raggruppandole in due grandi sottoinsiemi di tecnologie digitali innovative, cioè le tecnologie dell'informazione (IT) e le tecnologie operazionali (OT).

Rientrano nel primo gruppo:

- *Industrial Internet of Things*: o “Internet delle cose”, ovvero tutta quella rete di dispositivi connessi ad internet (si pensi ai sensori per il fitness, gli elettrodomestici, le radio) che possono essere dotati di intelligenza grazie a sensori, processori o software. Questa tipologia di prodotti non è solo di utilizzo comune e quotidiano, ma anche per finalità industriali (internet delle cose industriali), a riprova del fatto che è teoricamente possibile collegare ad una rete qualunque cosa, purchè sia dotata di un indirizzo IP e della capacità di scambiare dati attraverso la rete, senza la necessità dell’intervento umano;
- *Industrial Analytics*: tecnologie in grado di sfruttare le informazioni celate nei big data;
- *Cloud Manufacturing*: applicazione in ambito manifatturiero del *cloud computing*.

Rientrano nel secondo gruppo:

- *Advanced Automation*: tecnologie affini alla robotica, con riferimento ai più recenti sistemi di produzione automatizzati;
- *Advanced Human Machine Interface (HMI)*: dispositivi indossabili e nuove interfacce uomo/macchina;
- *Additive Manufacturing*: categoria di tecnologie affine a quanto già individuato da Boston Consulting.

Secondo stime di Federmeccanica pubblicate nel 2016, l'adozione delle tecnologie abilitanti dovrebbe contribuire alla riduzione del time to market e dei costi di personalizzazione dell'offerta, con ulteriori benefici in termini di produttività dei fattori e informazioni disponibili sui processi di produzione. Il fenomeno della quarta rivoluzione industriale è stato oggetto di diversi studi, al fine di comprenderne le conseguenze sia sul piano sociale che economico.

Dalla ricerca *The Future of the Jobs* presentata al World Economic Forum è emerso che i fattori tecnologici e demografici influenzeranno profondamente l'evoluzione del lavoro. La tecnologia del cloud e la flessibilizzazione del lavoro hanno iniziato ad influenzare le dinamiche già a partire dal 2016. Secondo lo studio l'effetto sarà la creazione di 2 milioni di nuovi posti di lavoro, ma contemporaneamente ne spariranno 7, con un saldo netto negativo di oltre 5 milioni di posti di lavoro. L'Italia ne uscirà con un pareggio (200 000 posti creati e altrettanti persi), meglio di altri Paesi come Francia e Germania. A livello di gruppi professionali, le perdite si concentreranno nelle aree amministrative e della produzione: rispettivamente 4,8 e 1,6 milioni di posti distrutti. Secondo la ricerca compenseranno parzialmente queste perdite l'area finanziaria, il management, l'informatica e l'ingegneria. Cambiano di conseguenza le competenze e abilità ricercate: nel 2020 il problem solving rimarrà la competenza non specifica più ricercata, e parallelamente, diventeranno più importanti il pensiero critico e la creatività.

Industria 4.0., infatti, presuppone un cambiamento totale del paradigma attuale, sia da un punto di vista tecnologico, ma anche organizzativo, di approccio alle macchine ed alla rete, e dunque un ripensamento di tutte le competenze necessarie alla guida del processo evolutivo e produttivo.

Si stima che tale scenario sarà il fulcro della prossima competizione industriale, e dunque una massiccia digitalizzazione delle aziende comporterà non solo acquisire nuove tecnologie o macchinari, ma proprio attivare un processo di riqualificazione del personale, dal management alla manodopera.

Bisognerà perseguire obiettivi di flessibilità, velocità, qualità, produttività e maggiore competitività dei propri prodotti.

Saranno richieste nuove competenze e conoscenze, e un ripensamento anche dell'orario e dei rapporti lavorativi, per rendere l'azienda più smart ed efficiente.

Bisognerà snellire i processi produttivi, i loro sprechi, e i tempi morti o le attività prive di valore: modularità e riconfigurabilità continua devono essere i pilastri alla base della produzione di una impresa smart, di una impresa 4.0.

1.4 Sviluppi futuri

Il modello di produzione industriale sarà sempre più sartoriale, più personalizzato, dove il cliente potrà intervenire con le proprie richieste in ogni fase del processo produttivo: dalla progettazione, passando per la produzione, fino alla commercializzazione del prodotto.

L'interconnessione tra i diversi strumenti produttivi della medesima azienda, e tra aziende diverse, permetterà una migliore integrazione e collaborazione tra diversi partner, permettendo una riduzione di costi e tempi di risposta: si delineerà così una chance di rilancio sul mercato per tutte le aziende del settore manifatturiero, anche con limitate capacità produttive, che potranno far fronte ad una domanda più precisa ed immediata, senza sprecare preziose risorse, grazie ad una programmazione lavorativa più precisa e strutturata.

Va sottolineato come non sia sufficiente adottare in modo isolato o sporadico una o qualche tecnologia di quelle in precedenza descritte, piuttosto è necessario integrare le diverse risorse a disposizione per creare valore addizionale e ridurre le inefficienze. Ogni azienda vedrà mutare i processi relativi agli acquisti, alla produzione, alle relazioni con il mercato, alla formazione del personale.

Ulteriori benefici del processo di automazione potranno essere individuati nella maggiore velocità nel passaggio da prototipo a produzione in serie, visto che progettazione e produzione saranno due aspetti esponenzialmente più integrati nel processo produttivo.

Ancora sarà possibile riordinare automaticamente i beni o i pezzi in esaurimento, offrendo un'esperienza di acquisto più smart, o un processo di rifornimento più

efficiente: si eviteranno così anche inutili costi di stoccaggio delle merci, o canoni di locazione di capannoni inutilizzati.

In termini di produttività invece si prospetta una progressiva ottimizzazione dei procedimenti realizzata in tempi minori, sia con riferimento all'adattamento delle attrezzature, sia con riferimento alla sostituzione di utensili.

Oltretutto si avrà una riduzione dei margini di errore e dei fermi macchina, un progressivo aumento di performance ed affidabilità generale di tutte le infrastrutture di produzione e della maggiore qualità del prodotto da essi ottenuta.

L'ottenimento di migliori standard qualitativi avviene attraverso la produzione di una quantità inferiore di materiale di scarto, tramite l'utilizzo di una sensoristica che permette di controllare in tempo reale il processo produttivo, implementando un monitoraggio sistematico della qualità stessa. Un ulteriore beneficio riscontrabile è dovuto alla possibilità di una maggiore integrazione delle filiere e catene di fornitura e subfornitura. Tali vantaggi consistono in sistemi di approvvigionamento e di logistica resi più efficienti dalle nuove tecnologie che li supportano, con una migliore gestione del magazzino e degli ordini, ottimizzando i rapporti con i fornitori all'interno di ecosistemi collaborativi. Un altro aspetto positivo riguarda poi la maggiore sicurezza del posto di lavoro, dovuta ad una migliore interazione e agilità di interfaccia uomo-macchina che permette una sensibile riduzione del numero di errori ed infortuni oltre ad un miglioramento delle condizioni di lavoro e dell'ergonomia dei locali produttivi. Infine, un ulteriore elemento positivo riguarda la sostenibilità ambientale e la responsabilità sociale dell'impresa, tema d'attualità ed oggi divenuta fonte di vantaggio competitivo. Infatti, la riduzione dei consumi energetici e delle emissioni ha conseguenze dirette sull'intero ciclo di vita del prodotto, riducendo notevolmente l'impatto ambientale

1.5 Manutenzione Predittiva

Dopo un primo necessario preambolo sulla quarta rivoluzione industriale, sull'industria 4.0 e sullo Smart Manufacturing (SM) ora ci si può concentrare sull'argomento centrale di questo elaborato ossia la Manutenzione predittiva.

In particolare, in questo elaborato ci concentreremo su una sua particolare applicazione che è la Manutenzione predittiva.

Lo Smart Manufacturing differisce dal manufacturing classico in quanto è volto ad integrare il processo di produzione tradizionale con sistemi informativi e sistemi di intelligenza avanzati in modo da tenere sempre più sotto controllo tutte le fasi della produzione.

È evidente che nello Smart Manufacturing la raccolta dei dati e i dati stessi hanno un ruolo fondamentale. Infatti, solo raccogliendo i dati in modo tempestivo (se non istantaneo) e analizzandoli con altrettanta velocità si possono raggiungere gli obiettivi prefissati dall'industria 4.0.

I dati, in questo modo, possono diventare un importante strumento decisionale per operatori e per intelligenze artificiali sulla base del quale poter attuare azioni correttive o di miglioramento del processo.

Ed è proprio sull'importanza dei dati e della loro elaborazione che pone le basi il tema principale di questo elaborato: la Manutenzione predittiva.

Il motivo per cui ci si concentra su questo tipo di studio è perché le attività di manutenzione possono incidere non poco sui costi generali di produzione: *“The impact of maintenance activity in the manufacturing world takes from 15% to 60% of the overall production costs. This highlights the need for companies to improve the available tools to maintain their systems. It would ensure to reduce the overall cost of the entire production and, thus, of the product.”*¹

¹ Data-Drive framework for Electrode Wear Prediction in Resistance Spot Welding

Da qui nasce allora l'interesse dell'industria nell'approfondire i temi di manutenzione e tutte le conseguenze che ne derivano.

Le strategie di manutenzione possono essere di vario tipo e si differenziano in base al modo che hanno di affrontare il manifestarsi di un guasto, avaria, fermo macchina o (nei casi un po' più articolati) una semplice deriva.

È evidente che ognuno di questi eventi si ripercuote economicamente sul bilancio dell'azienda e quindi l'utilizzo di un tipo di strategia rispetto a un'altra può portare dei saving non trascurabili.

Da qui quindi l'importanza di scegliere con cura il tipo di politica di manutenzione che più si adatta al processo o al macchinario su cui verrà eseguita.

Ci possono essere vari tipi di strategie di manutenzione ma quelli più diffusi e su cui vale la pena soffermarsi di più sono: la manutenzione correttiva (o a guasto), la manutenzione preventiva e infine la manutenzione predittiva.

- 1- **Manutenzione correttiva:** in questo tipo di strategia si aspetta l'avvenimento del guasto o del fermo macchina prima di intervenire. Quindi solo dopo l'avvenimento del guasto si può procedere con un intervento manutentivo per riportare il macchinario o il processo alle prestazioni che aveva prima del fermo. Questo tipo di strategia però può essere applicata solamente per quei processi che non incidono particolarmente sul bilancio economico dell'azienda e che non andrebbero a bloccare poi l'intera filiera produttiva (altrimenti i danni in termini economici e in termini di volumi prodotti di questo sarebbero molto elevati).
- 2- **Manutenzione preventiva:** questo tipo di strategia invece si pone l'obiettivo di intervenire con l'opera di manutenzione per evitare il fermo macchina. In quindi l'operatore agisce sulla macchina prima che il guasto sia avvenuto. In questo modo si possono ridurre gli scarti e si può evitare che lo scarto si propaghi lungo tutta la filiera produttiva. Questo tipo di manutenzione è programmata su base temporale e la condizione di base per la sua applicazione è il fatto che la durata

del componente (fino a rottura) o della fase di processo (fino al suo fallimento) sia adeguatamente conoscibile. Un esempio di manutenzione preventiva può essere quello del controllo degli estintori che per norma di legge devono essere controllati seguendo determinate cadenze temporali.

Tutto ciò rende l'applicazione della manutenzione predittiva molto limitata. Infatti, la maggior parte dei processi o comunque dei componenti sono influenzati per lo più dal loro utilizzo (che dalla loro vita). Nelle aziende di oggi che sono caratterizzate da un altissimo tasso di dinamicità e da soventi di pianificazione della produzione quindi le condizioni i macchinari lavorano cambiano di giorno in giorno, se non più di frequente, e quindi la manutenzione predittiva diventa sempre più di difficile applicazione.

- 3- **Manutenzione Predittiva.** È la strategia che in ordine di tempo si è sviluppata per ultima e che si sposa perfettamente con l'idea di Smart Manufacturing che ci viene proposta dall'industria 4.0.

Alla base di questo tipo di politica si cela una forte componente di raccolta e di analisi dei dati. Questi devono essere raccolti ed elaborati istantaneamente (o quasi) per tenere sotto controllo alcuni indicatori di "salute" del macchinario o del processo. In questo modo al primo segnale di allarme si può intervenire per prevenire l'aggravarsi della situazione e per evitare un fermo macchina o di processo che sarebbe molto più costoso.

Questo tipo di manutenzione si è diffuso negli ultimi anni grazie soprattutto alla diminuzione del costo di tutti gli equipaggiamenti di sensori e dei sistemi computazionali che è avvenuto e sta avvenendo in questo periodo. C'è da stare attenti però al fatto che seppur i costi sono diminuiti non sono comunque trascurabili; quindi, una strategia di questo tipo è applicabile soltanto a quei macchinari che necessitano di essere sempre in funzione con assoluta certezza.

È proprio su quest'ultima strategia di manutenzione che si concentra l'elaborato in questione e in particolare ci si focalizzerà sulla manutenzione predittiva per una saldatrice a punti.

È stata messa quindi in atto, all'interno del DIGEP, una campagna sperimentale volta alla raccolta di numero dati relativi ai punti di saldatura che sono stati utilizzati per cercare di prevedere la qualità del giunto all'aumentare del numero delle saldature. È stato quindi usato un approccio data-driven e computer-integrated che sposa in tutto e per tutto la filosofia dell'industria 4.0 e dello Smart Manufacturing.

2. Processo di saldatura

2.1 Cosa si Intende per processo di saldatura

Il processo di saldatura è una tecnica di giunzione che permette di unire i modo definitivo due giunti (pezzi metallici) con o senza l'apporto di materiale sotto l'azione di calore.

Prima di procedere con una descrizione più approfondita è bene presentare una piccola porzione di terminologia che può risultare utile nel proseguo dell'elaborato.

- Lembi: sono i bordi delle superfici metalliche che sono interessate al processo di saldatura
- Metallo d'apporto: è il metallo "fuso" che viene distribuito tra i 2 lembi per collegarli
- Bagno di metallo: è la parte di metallo che durante la fusione si trova allo stato liquido
- Cordone di saldatura: è il metallo fuso che si solidifica poi per raffreddamento.

Infine, per saldabilità si intende l'attitudine di un metallo a essere saldato e in particolar modo si può dire che un materiale ha buone caratteristiche di saldabilità se un pezzo prima rotto e poi successivamente saldato, conserva lungo il giunto caratteristiche meccaniche il più simili possibile a quelle che aveva prima della rottura. Inoltre, la saldabilità di un materiale è condizionata dalle sue caratteristiche fisiche e chimiche (quali ad esempio temperatura di fusione, conducibilità elettrica e termica). In caso di materiale poco saldabili, infine, si può ricorrere all'utilizzo di particolari polveri disossidanti (fungono quasi da catalizzatore) che hanno il compito di agevolare il processo di saldatura.

2.2 Tipologie di processi di saldatura

Esistono vari tipi di saldature che possono essere suddivisi in due macrogruppi: saldature autogene e saldature Eterogene. Questi due macrogruppi si ramificano poi a seconda della modalità di esecuzione. Per chiarezza di seguito un immagine che raggruppa le metodologie più diffuse.

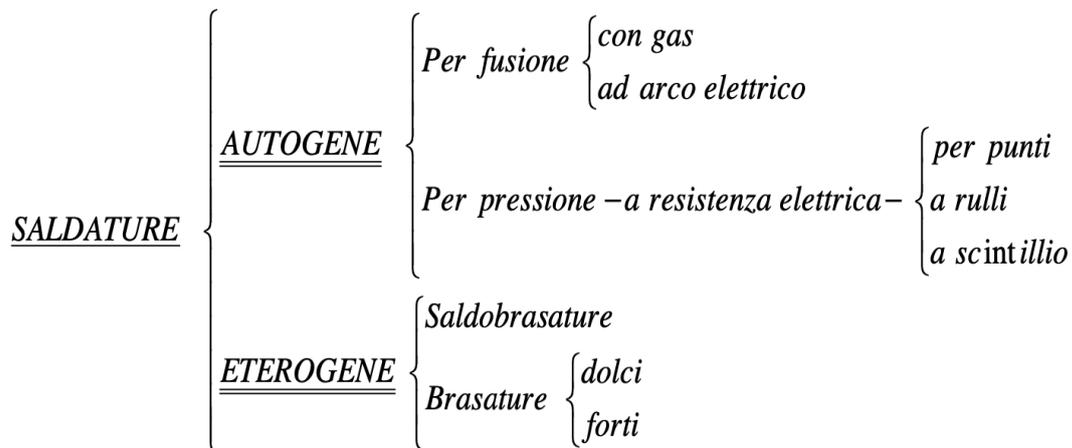


Figura 1- Tipologia di saldature [6]

Le saldature eterogene sono quelle in cui il metallo di base non fonde e non prende parte alla formazione del giunto e il cordone di saldatura sarà quindi costituito solamente dal metallo d'apporto che sarà di conseguenza diverso da quello di base.

Qui si possono distinguere due tipi di saldature diverse:

- Saldobrasature: se i lembi dei pezzi che verranno poi riempiti dal col metallo d'apporto vengono preparati tramite una cianfrinatura (ossia gli spigoli dei lembi vengono tagliati secondo una determinata angolatura)
- Brasatura: se i lembi dei pezzi non vengono preparati e non avverrà neanche la fusione dei due lembi. Sarà infatti il metallo di apporto che penetrando per capillarità tra i pezzi andrà a costituire il giunto.

Ne riporto di seguito un esempio.

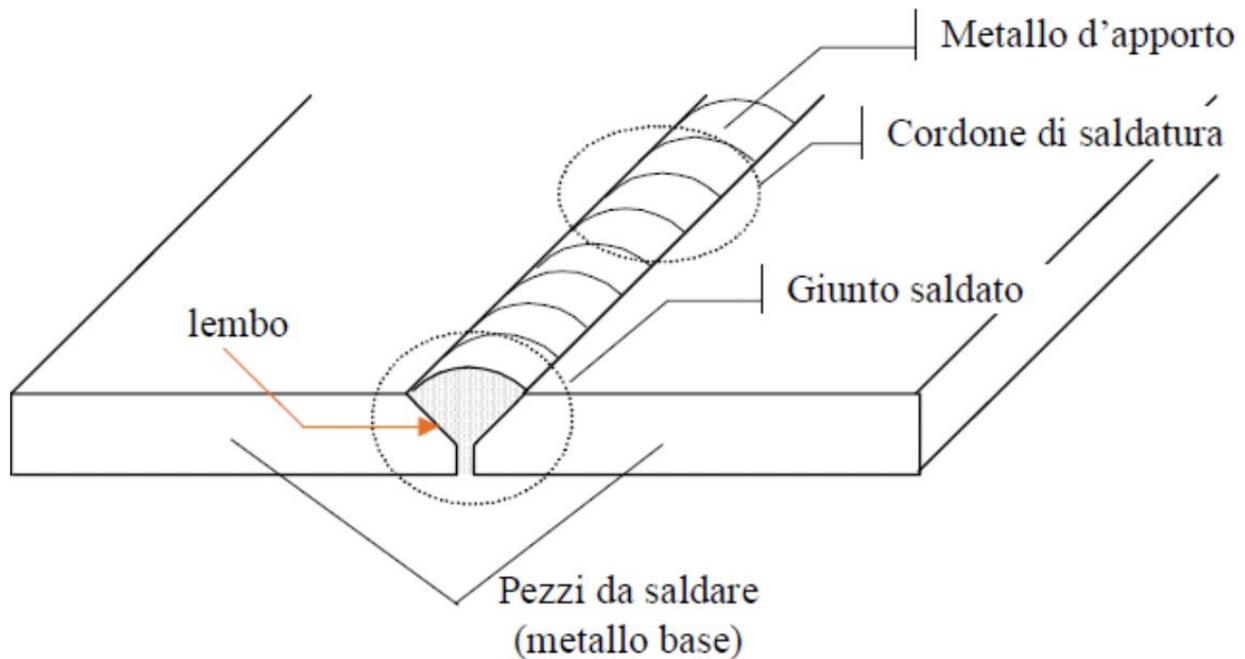


Figura 2 – Terminologia [6]

Le saldature autogene invece sono quelle che si ottengono quando il materiale di base fonde prendendo parte alla formazione del giunto. Un eventuale metallo d'apporto sarà inoltre uguale a quelli di base perché si deve andare a ottenere continuità strutturale all'intero della giunzione e una resistenza meccanica pari a quella dei pezzi da saldare.

La saldatura autogena inoltre può avvenire in due modi:

- Per fusione quando i pezzi vengono uniti allo stato liquido. A seconda del modo con cui viene raggiunto il calore necessario alla fusione del materiale si possono distinguere saldature a gas o saldature ad arco.
- A pressione quando i pezzi vengono messi a contatto tra di loro e vengono attraversati da un passaggio di corrente che porterà alla formazione del giunto grazie all'effetto Joule.

La saldatura a pressione, infine, si può a sua volta suddividere, oltre che in quella a punti che spiegheremo successivamente, in:

- Saldatura a rulli: dove gli elettrodi hanno la forma di ruota e svolgono un moto rotatorio in modo continuo per far avanzare le lamiere metalliche e per portare alla formazione di lunghe saldature continue
- Saldatura per scintillio: in questo tipo di saldatura i componenti che si trovano entrambi sotto tensione elettrica vengono avvicinati lentamente. Durante il contatto vengono generati una serie di spruzzi che portano alla fusione dei materiali e alla conseguente generazione del giunto.

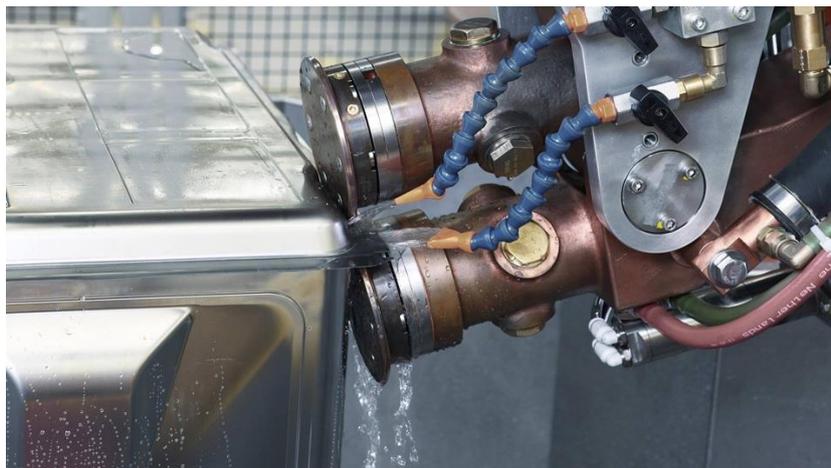


Figura 3 - Saldatura a rulli [9]



Figura 4 - saldatura per scintillio [10]

2.3 Processo di saldatura a punti

Tra i vari processi da saldatura autogena a pressione il più diffuso, soprattutto in ambito automotive, è il processo di saldatura a punti.



Figura 5 - saldatrice a punti

Questo processo presenta numerosi vantaggi, tra cui la sua semplicità, grande tendenza all'automazione e bassi costi produttivi. Ma si deve guardare anche l'altro lato della medaglia e infatti è da sottolineare che il controllo della qualità del giunto di saldatura pone molti problemi a causa della complessità del processo di unione dei due materiali e a causa della presenza di vari fattori di interazione, tra cui la composizione chimica dei materiali, l'usura dell'elettrodo e molti altri.

Inoltre un altro grande problema è che trattandosi di una saldatura autogena (senza quindi l'apporto di un metallo esterno) il nocciolo di fusione del materiale, weld nugget, si trova all'interno dei due lembi di materiale fuso quindi per poter procedere con un'analisi di qualità del giunto sarà necessario effettuare delle prove di tipo distruttivo, che oltre a essere estremamente time-consuming, portano una perdita dal punto di vista economico all'azienda in quanto il materiale dopo essere stato testato non può essere riutilizzato.

È proprio per questo motivo che l'attenzione delle aziende si è focalizzata sul monitoraggio e la raccolta dei dati per cercare di tenere sempre più sotto controllo questo processo ed assicurare così la qualità dei punti di giuntura.²

Durante un processo di saldatura a punti (o a resistenza) due elettrodi sono utilizzati per pressare meccanicamente due lastre metalliche e per tenerle ferme; in seguito, un flusso di corrente ad alta intensità viene fatto passare attraverso gli elettrodi e di conseguenza attraverso le lastre metalliche.

Il passaggio di corrente per effetto Joule genera un forte aumento di calore che consente di raggiungere la temperatura necessaria per far fondere localmente lastre metalliche formando in questo modo il punto di giuntura (nugget).

Tutto questo procedimento pone le basi sulla legge di joule e quindi sul fatto di produrre un'adeguata quantità di calore (energia) tramite il passaggio di corrente.

² Use of electrode displacement signals for electrode degradation assessment in resistance spot welding

Per spiegare ciò, in modo molto semplificato, si può partire da:

$$L = \Delta V \cdot q \tag{1}$$

Dove L è il lavoro, ΔV la differenza di potenziale elettrico e q è la carica elettrica che attraversa il materiale in un determinato istante di tempo.

Da cui:

$$q = i \cdot \Delta t \tag{2}$$

E sostituendo nella formula precedente

$$L = \Delta V \cdot i \cdot \Delta t \tag{3}$$

Infine, la differenza di potenziale può anche essere vista come

$$\Delta V = R \cdot i \tag{4}$$

E si giunge quindi a

$$L = R \cdot i^2 \cdot \Delta t \tag{5}$$

R è la resistenza del conduttore mentre i è l'intensità di corrente che passa attraverso il conduttore nel periodo Δt .

Considerando però che nel processo di saldatura il Δt è molto piccolo allora ci sarà bisogno di elevate resistenze e di alte intensità di corrente per produrre una quantità di energia adeguata (Lavoro) per provocare un aumento locale di temperature sulle due lastre di metallo da saldare e andare così a formare il giunto.

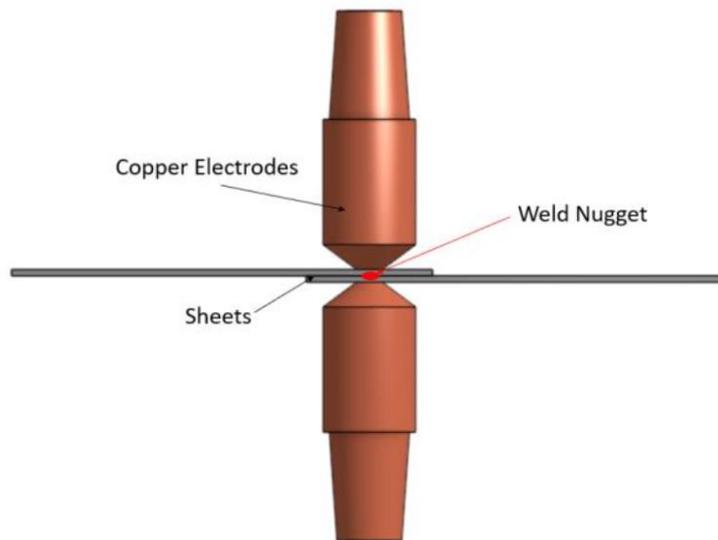


Figura 6 - schematizzazione del processo di saldatura a punti [3]

“When the current or resistance is not constant, integrating the above expression will result in the heat generated in a time interval τ . For resistance welding, the heat generation at all locations in a weldment, rather than the total heat generated, is more relevant, as heating is not and should not be uniform in the weldment. In addition, the heating rate is more important than the total heat, as how fast the heat is applied during welding determines the temperature history and, in turn, the microstructure. This can be easily understood by considering an aluminum welding. If the welding current is low, melting may not be possible no matter how long the heating is, due to the low electrical resistivity of aluminum, and the fact that the heat generated is conducted out quickly through the water-cooled electrodes and the sheets due to the high thermal conductivity of aluminum. In general, the electric and thermal processes should be considered together in welding.”³

³ Use of electrode displacement signals for electrode degradation assessment in resistance spot welding

È da sottolineare che nella saldatura a punti è soprattutto importante il calore generato localmente nelle singole posizioni dei giunti più che il calore totale generato e che l'aumento di calore non dovrebbe essere affatto uniforme.

Inoltre, più che al calore totale generato durante il processo si dovrebbe fare attenzione al tasso di calore generato e a che velocità lo si è applicato. Sono infatti questi i fattori che determinano poi la qualità del giunto e di conseguenza la sua microstruttura.

Per capire il concetto con più chiarezza si può provare a pensare di saldare due lastre di alluminio. Se la corrente che le attraversa è molto bassa, per quanto sia lunga la sua applicazione, la saldatura non potrà mai avvenire. Il calore totale generato potrà anche essere elevato ma è elevata anche la velocità con cui il calore viene espulso dal materiale a causa della elevata conducibilità dell'alluminio.

Da qui quindi l'importanza di considerare contemporaneamente processi termici ed elettrici durante un processo di saldatura.

Un altro fattore importante che deve essere considerato quando si eseguono più punti di giuntura in successione l'uno con l'altro è l'effetto "shunting".

*"The welding current may be diverted from the intended path by the previously made welds. As a result, the current or current density may not be sufficient to produce a quality weld. The shunting effect is a strong function of the bulk resistivity of the sheet material."*⁴

⁴ Resistance Welding: Fundamentals and Applications

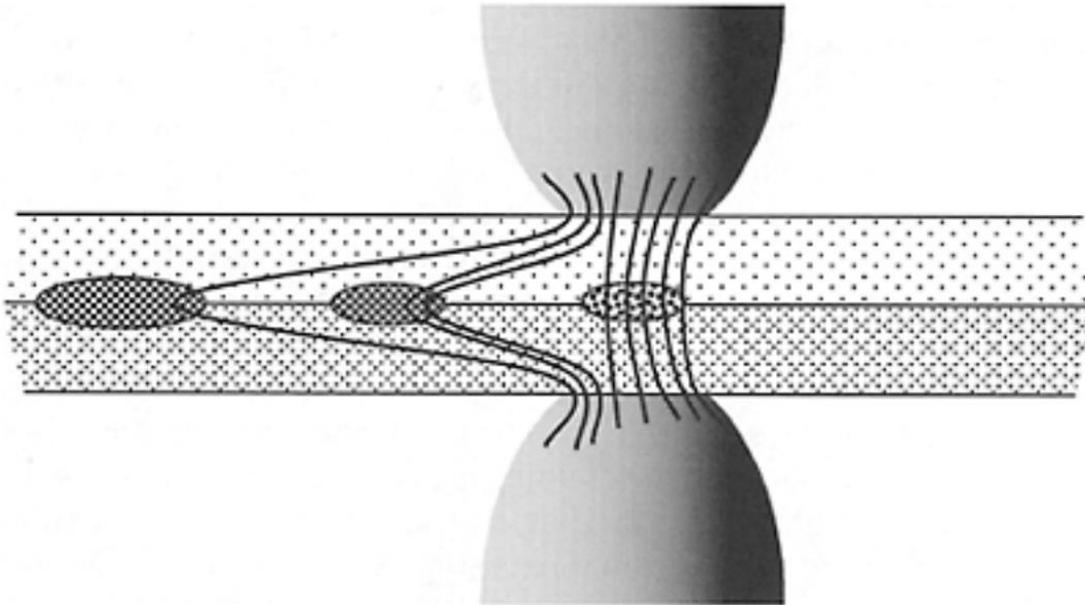


Figura 7 - effetto shunting [1]

Se i punti di giuntura sono troppo ravvicinati infatti la corrente potrebbe essere deviata dal suo cammino da delle giunture fatte in precedenza. Questo può portare alla perdita di intensità di corrente che potrebbe poi non essere più sufficiente a formare un punto di saldatura sufficientemente qualitativo. Questo effetto è tanto più accentuato quanto più un materiale è un buon conduttore; quindi, per questo tipo di materiali è necessario lasciare più spazio tra un punto di saldatura e l'altro.

La forza meccanica di un giunto (e quindi la sua qualità) è strettamente collegata alla grandezza del "nugget" ossia alla grandezza del nocciolo di fusione che si trova all'interno o, più nello specifico, tra le due lastre di metallo saldate.

Per cercare di ottenere la grandezza del nugget che si vuole si può agire su vari parametri di processo e tra i più importanti possiamo elencare:

- Tempo di pressione (meccanica) degli elettrodi: Tempo di pressione: tempo che intercorre tra l'inizio di applicazione della pressione e l'inizio del passaggio di corrente
- Tempo di saldatura (tempo in cui scorre la corrente)

- Tempo di mantenimento: intervallo di tempo tra la fine del passaggio di corrente e la fine dell'applicazione della pressione
- Intensità di corrente
- Pressione dell'elettrodo

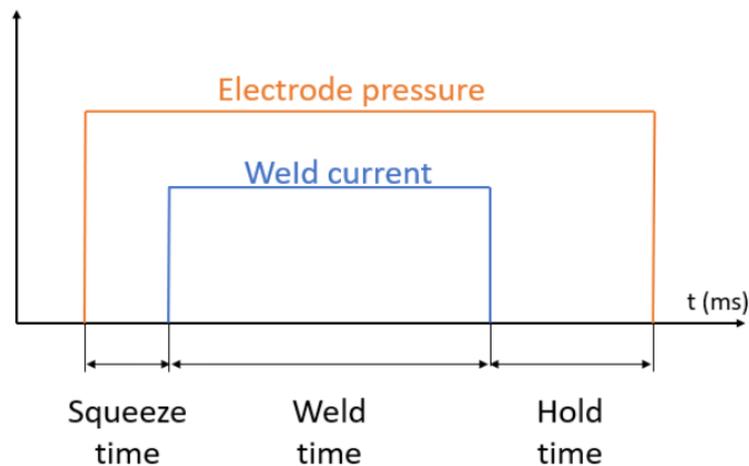


Figura 8 - ciclo di processo [3]

Anche se tutti questi fattori possono essere controllati per cercare di dimensionare come più si vuole la grandezza del giunto, tuttavia la qualità del punto di saldatura non può essere ancora del tutto garantita. Ci sono molte altre variabili che possono provocare difetti in un punto di saldatura e tra queste la più impattante è senza ombra di dubbio l'usura dell'elettrodo.

“Other phenomena such as shunting, edge proximity, initial sheet gaps and electrode wear can be sources of weld defects and hence, responsible for poor joint quality [24]. The first three causes can be avoided with a correct joint design, whereas electrode wear plays a critical role.”⁵

⁵ Data-Drive framework for Electrode Wear Prediction in Resistance Spot Welding

2.4 Problema di usura dell'elettrodo

L'elettrodo è un conduttore elettrico di prima specie (sarà quindi un metallo o un semiconduttore) che nel caso della saldatura a punti è utilizzato per trasferire la corrente attraverso le lamiere in modo da formare il giunto di saldatura.

Gli elettrodi possono quindi essere costituiti dai materiali più disparati e possono inoltre assumere varie forme.

Nel caso preso in esame, come solitamente accade per la saldatura a resistenza, l'elettrodo è di rame (o comunque di una sua lega) e ha una forma cilindrica.

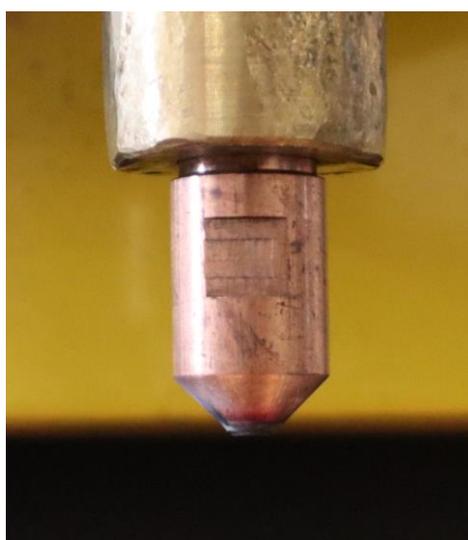


Figura 9 - elettrodo

L'elettrodo, quindi, appare essere l'elemento chiave e imprescindibile ed è infatti il cuore del processo di saldatura. Proprio per questo motivo si deve prestare grande attenzione al suo ciclo di vita e alla sua possibile usura.

"In many manufacturing plants, 60% of the defective spot welds are due to worn electrodes [25]. Typically, a modern body car contains from 4000 to 7000 spot welds

[12]. Having an accurate control of the electrode wear can ensure the required quality level by the joint and, thus, it would allow to reduce the number of weld spots needed to assembly a body car.”⁶

Inoltre, da dati sperimentali si evince che nella maggior parte degli impianti manifatturieri più della metà dei punti di saldatura difettosi sono causati dall'usura dell'elettrodo e se si va a sommare questo dato a una produzione su larga scala si può iniziare a capire quanto possa risultare importante studiare il ciclo vita di questo materiale. Se pensiamo che in media un'automobile contiene al suo interno tra i 4000 e i 7000 punti di saldatura allora essere in grado di predire con accuratezza l'usura di un elettrodo garantirebbe un importante aumento della qualità dei punti delle giunzioni andando a rendere necessari sempre meno punti di saldatura per ogni automobile. Un risultato di questo tipo garantirebbe quindi una riduzione dei costi di produzione (se si pensa al numero di automobili prodotte giornalmente per ogni stabilimento) non trascurabile.

L'usura dell'elettrodo aumenta all'aumentare del numero di saldature che esegue ed è causata dai numerosi e successivi fenomeni chimici, meccanici, termici ed elettrici che interessano l'elettrodo durante tutti i punti di giunzione.

Dal punto di vista meccanico ci sono tre tipi di usura principali:

- Usura radiale
- Usura assiale
- Erosione della superficie di contatto, noto in letteratura come 'pitting'.

All'aumentare del numero di saldature, la superficie di contatto si deforma e si ingrandisce sempre di più

⁶ Data-Drive framework for Electrode Wear Prediction in Resistance Spot Welding

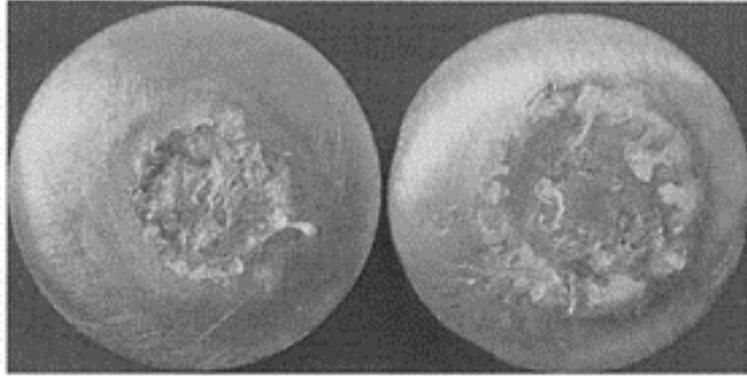


Figura 10 - deformazione faccia dell'elettrodo [1]

La faccia dell'elettrodo (superficie di contatto) infatti viene deformata in seguito ai ripetuti processi di riscaldamento e di urto meccanico con le lastre metalliche che passano attraverso il processo di saldatura. Spesso sono infatti queste lastre a raccogliere dei residui di materiale dell'elettrodo che si vanno a raccogliere nel giunto dandogli, delle volte, un colore leggermente d'orato.

La faccia dell'elettrodo, inoltre, all'aumentare del numero delle saldature inizia a mostrare sempre più tracce di ossidazione.

L'uniformità della superficie di contatto tra elettrodo e metallo è fondamentale per la buona riuscita di un processo di saldatura e, come si può evincere, i due effetti sopra elencati (di deformazione e di ossidazione) vanno proprio in senso opposto. La non uniformità della faccia dell'elettrodo, infatti, provoca una non uniformità nella distribuzione della resistenza andando quindi a influenzare direttamente il passaggio di corrente tra elettrodo e lastre di metallo e quindi il formarsi del punto di giuntura.

E quindi all'aumentare del numero di saldature e all'accumularsi di questi effetti l'usura dell'elettrodo aumenta e quindi la qualità del giunto può diminuire fino ad arrivare a punti di saldatura non più accettabili.

"When making a subsequent weld, the resistivity at the contact interface is not uniform due to the uneven resistivity distribution produced by the preceding welding on the electrode, and due to the nonuniform surface resistivity of the sheet, which changes

from weld to weld. (...) An accumulative effect of such a process is the continuous deterioration of the electrode surface. As a result, the current distribution changes from weld to weld and produces inconsistent welds if the electrode surface is damaged severely enough.”⁷

⁷ Resistance Welding: Fundamentals and Applications

3. Campagna sperimentale

3.1 Scopo della campagna sperimentale

Dal capitolo precedente si può comprendere quindi l'importanza del tenere sotto controllo l'elettrodo e in particolare il suo stato di usura. È proprio in questa direzione, allora, che si è concentrata la campagna sperimentale svolta all'interno del DIGEP e su cui si concentra elaborato.

Lo scopo di questa campagna sperimentale è quello, infatti, di usare un approccio guidato dai dati per cercare di predire la degradazione dell'elettrodo.

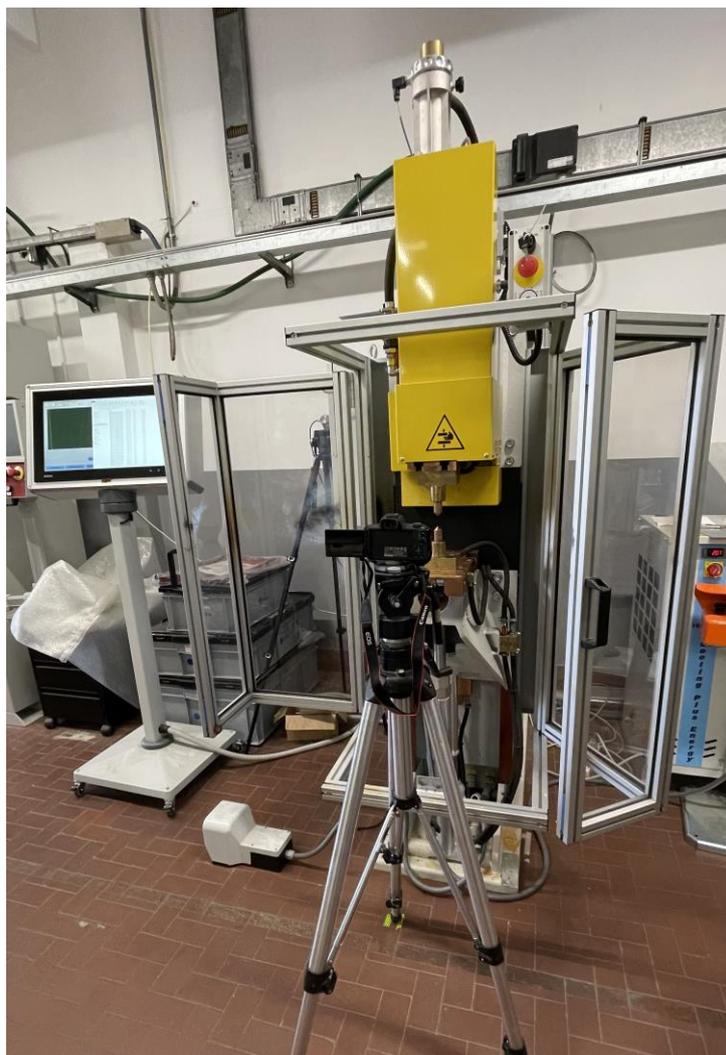


Figura 11 - saldatrice con sistema di sensori collegato

La campagna sperimentale è stata portata avanti attraverso l'uso di una saldatrice a punti a cui però, come si può vedere, è stato collegato un sistema di sensori e un computer per poter raccogliere una serie di dati durante ogni punto di saldatura eseguito. In questo modo analizzando i dati si può ottenere una traccia dell'andamento dello stato dell'elettrodo e del processo durante tutti i punti di giunzione.

Durante la campagna sperimentale sono state eseguiti più di 1200 punti di saldatura su delle lastre metalliche (DP590). Le lastre sono state scelte per essere il più simili possibile al materiale che viene utilizzato nell'industria automobilistica, settore che più sfrutta questo tipo di saldatura, per cercare di ottenere così dei dati che più possono poi diventare utili, in futuro, da un punto di vista industriale.

La saldatrice, inoltre, aveva montati su di sé 2 elettrodi troncoconici in fusi di una lega di Cu-Cr-Zr con un diametro di contatto nominale di 6mm.

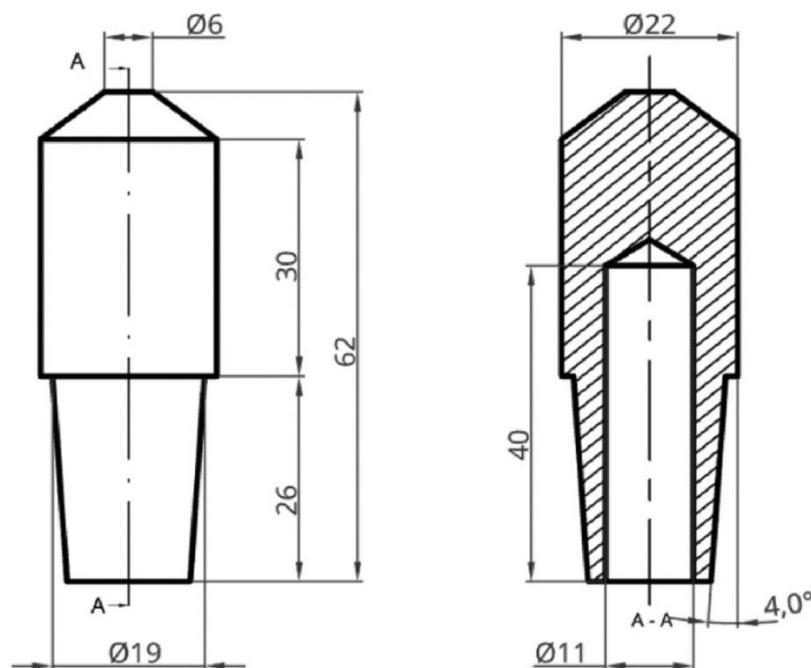


Figura 12 - forma dell'elettrodo usato durante la sperimentazione [2]

Durante il processo di saldatura l'elettro in basso era fisso mentre a muoversi per pressare le lastre era l'elettrodo superiore che è anche l'elettrodo su cui si concentra lo studio dell'usura.

3.2 Preparazione materiale per l'esperimento

Per prima cosa sono stati preparati 9 lastre metalliche in cui si è andati a segnare di dimensioni 200x300 mm in cui si è andata a segnare la posizione sulla quale sarebbero poi stati fatti i punti di giuntura. Questo procedimento è stato necessario in quanto i punti, per evitare shunting effect e altri fenomeni di interferenza, dovevano essere tutti alla stessa distanza per lo meno per mantenere le condizioni dell'esperimento il più stabili possibili.

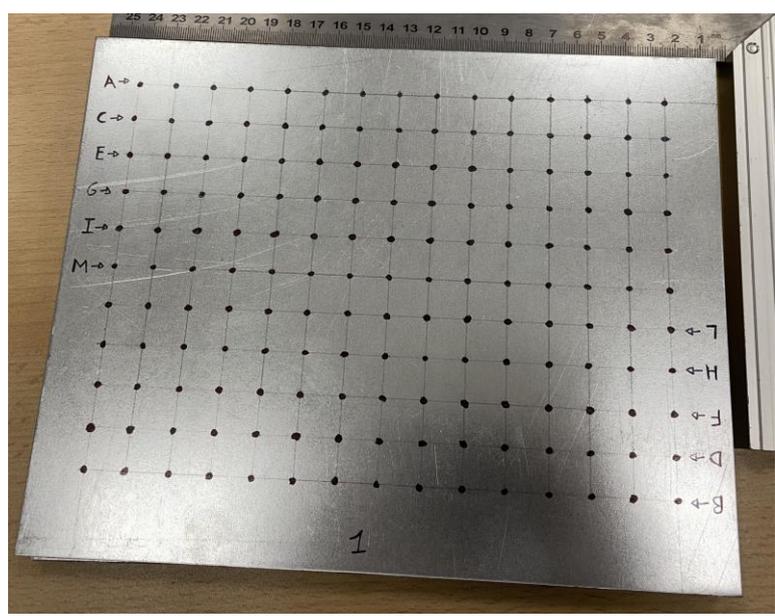


Figura 13 - esempio di lastra metallica

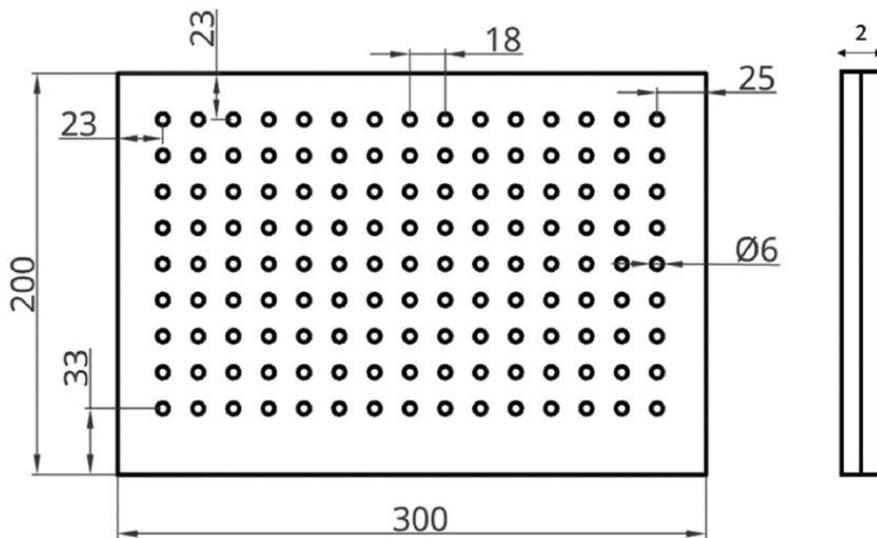


Figura 14 - misure della lastra metallica usata nell'esperimento [2]

Oltre alle lastre metalliche, però, si dovevano anche preparare i provini per le prove di trazione (shear test). Ogni provino aveva una dimensione di 30x100 e sono tutti stati segnati con le posizioni nelle quali doveva poi essere eseguito il punto di giuntura. Qui coppie di provini dovevano sovrapporsi parzialmente per essere saldate insieme e, in seguito, essere sottoposte a prova di trazione.

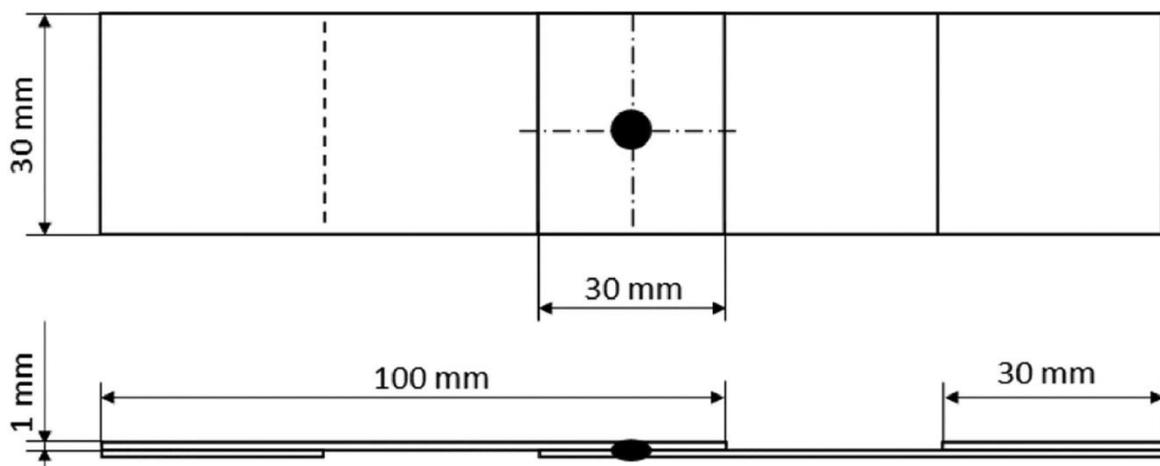


Figura 15 – misure dei campioni per lo shear test [2]

Un'ultima cosa, non banale, da preparare prima dell'inizio della campagna sperimentale, erano i parametri di processo per la saldatrice:

- Tempo di pressione (squeeze time) = 50ms
- $F_{weld} = 3000$ KN
- $I_{weld} = 8$ KA
- Weld time = 300 ms
- Hold time = 300 ms
- Tempo salita corrente = 100 ms
- Tempo discesa corrente = 100 ms

Di seguito riporto per chiarezza una schematizzazione del ciclo di saldatura usato nella campagna sperimentale.

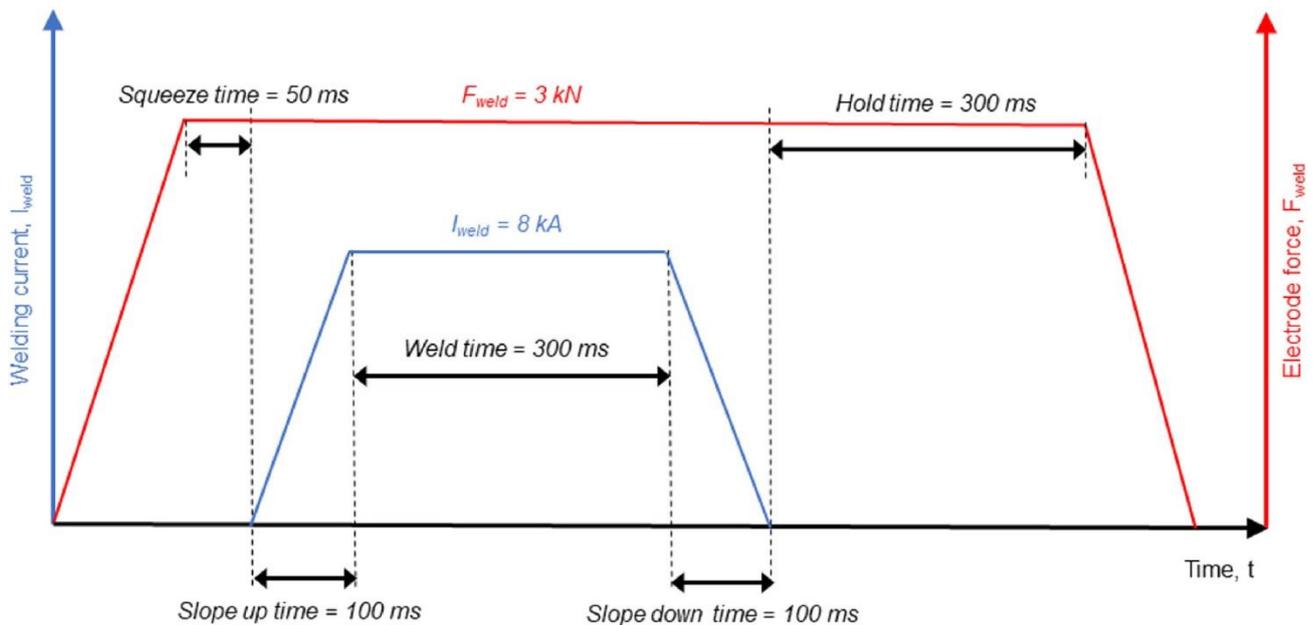


Figura 16 – schematizzazione del ciclo di saldatura usato nelle prove sperimentali [2]

3.3 Esecuzione dell'esperimento

Una volta preparato tutto il materiale e settati tutti i parametri del processo è stato possibile incominciare con la campagna sperimentale.

I test per misurare l'usura (il ciclo vita) dell'elettrodo sono stati portati avanti usando le 9 coppie di pannelli metallici che erano state preparate in precedenza.

Su ogni pannello sono state disegnate 9 righe e per ogni riga in modo equidistante sono stati disegnati 15 punti. Quindi per ogni coppia di pannelli metallici sono state quindi eseguiti di 135 punti di giunzione per un totale di 1215 punti. Per garantire poi la sicurezza dell'operatore durante la saldatura la macchina era dotata di sportelli trasparenti, che al bisogno potevano essere chiusi, per evitare di entrare a contatto con eventuali schizzi e di un pedale per poter avviare il processo di saldatura a distanza di sicurezza.

Prima di iniziare la campagna per controllo è stata presa misura dell'area di contatto dell'elettrodo prima di essere usato tramite un test di pressione sulla carta carbone.

Dopo la prima saldatura eseguita sulla prima coppia di lastre metalliche, tre punti di giunzione sono stati eseguiti su altrettante coppie di provini sovrapposte per ottenere così i primi 3 campioni per le prove di trazione.

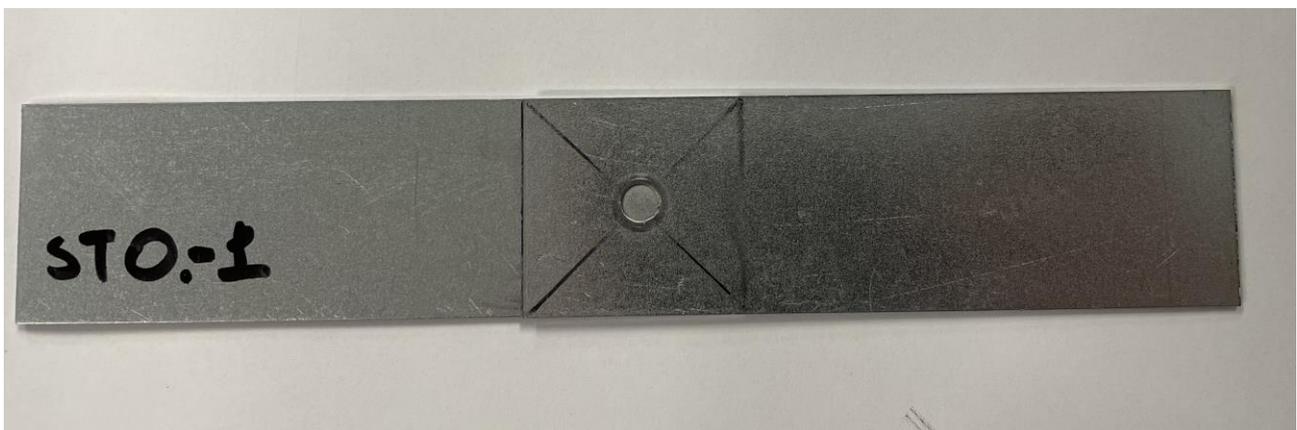


Figura 17 - provino per lo shear test

In questo modo si può andare poi a misurare la forza meccanica di un punto di giuntura eseguito da un elettrodo non ancora utilizzato.

In seguito, la campagna sperimentale continua con l'esecuzione degli altri punti di saldatura sulla coppia di fogli metallici ma alla fine di ogni riga di 15 punti viene eseguita una misura della degradazione dell'elettrodo attraverso il test della carta carbone (lasciando il segno della faccia dell'elettrodo su un foglio bianco). Dopo aver

raccolto questa misura, si può continuare la sequenza di punti di giuntura per testare la durata dell'elettrodo.

Ogni volta con una coppia di fogli metallici veniva completata, quindi ogni 135 saldatura, venivano saldati 3 provini per la prova di trazione.

Questo tipo di procedura è stata ripetuta per tutte e 9 le coppie di lastre metalliche. Durante ogni saldatura veniva inoltre misurato lo slittamento dell'elettrodo (electrode displacement) in modo automatico attraverso il sensore di posizione lineare Temposonics R-series che aveva una risoluzione di posizione $2 \mu\text{m}$ e una frequenza di acquisizione di 40 KHz. Da qui i dati dello slittamento dell'elettrodo venivano in seguito acquisiti attraverso il modulo di interfaccia NI-9862 CAN ed elaborati attraverso un software Labview.

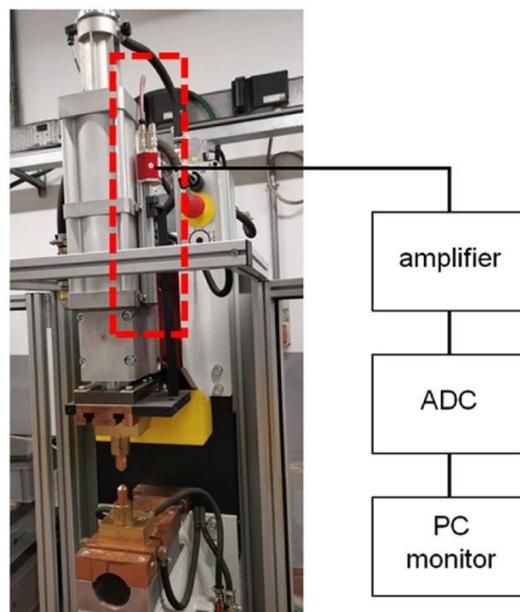


Figura 18 - sensori collegati alla saldatrice [2]

3.4 Test carta carbone

Come detto in precedenza, dopo la prima saldatura e poi a un ritmo di 15 veniva eseguita una misurazione sulla carta carbone.

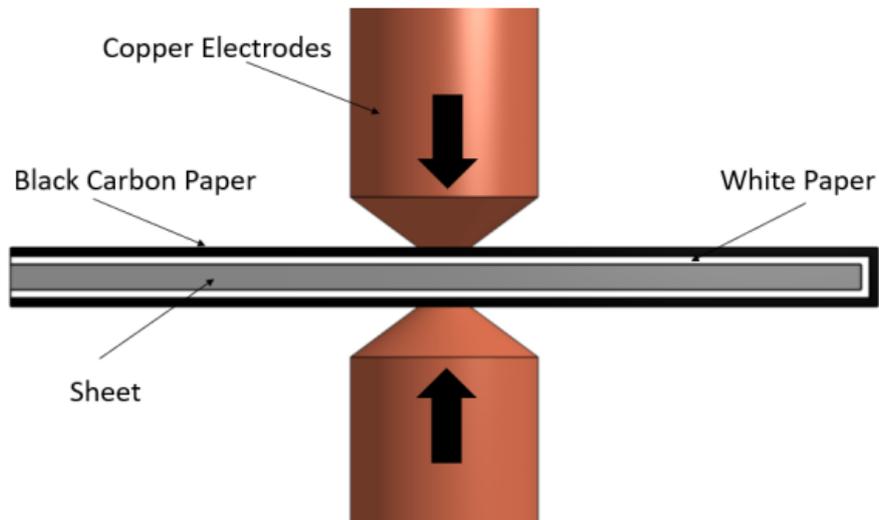


Figura 19 - schematizzazione della misurazione tramite carta carbone [3]

Questa misurazione è volta a tenere traccia della deformazione dell'area di contatto dell'elettrodo e quindi della sua deformazione meccanica dovuta alle precedenti saldature.

In questo test un foglio di carta carbone veniva sovrapposto a un foglio bianco ed entrambi i fogli vengono ulteriormente sovrapposti a una lastra metallica.

Inseguito viene eseguito un ciclo di saldatura senza il passaggio di corrente perché altrimenti i fogli di carta in presenza di elettricità avrebbero potuto infiammarsi. In questo modo rimane impressa in modo ben visibile la faccia dell'elettrodo sul foglio bianco.

In seguito, possono essere poi fatte numerose analisi sulla forma e sulle dimensioni delle superfici di contatto dell'elettrodo all'aumentare del numero delle saldature.

Riporto sotto il foglio delle impronte prese con la carta carbone dell'area di contatto dell'elettrodo che è stato poi utilizzato per le analisi successive.

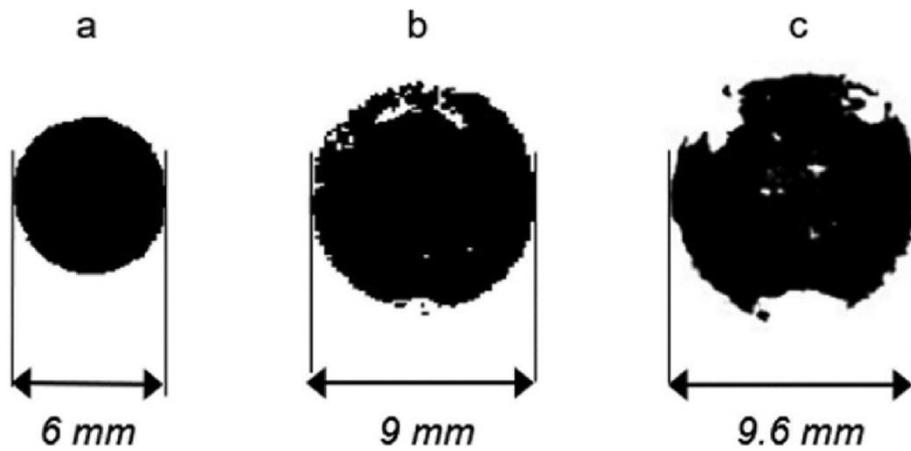


Figura 20 - impronte della faccia dell'elettrodo [2]

3.5 Prova di trazione

La prova di trazione è una delle prove che fornisce maggiori informazioni sulla qualità del giunto. Certo è però che è una prova distruttiva e quindi la sua utilità la si dimostra più sull'ambito di studio che su ambito applicativo.

Durante la prova di trazione il provino viene fissato ai lati da due morsetti che stringono il provino e iniziano poi a spostarsi a velocità costante in direzione opposta.

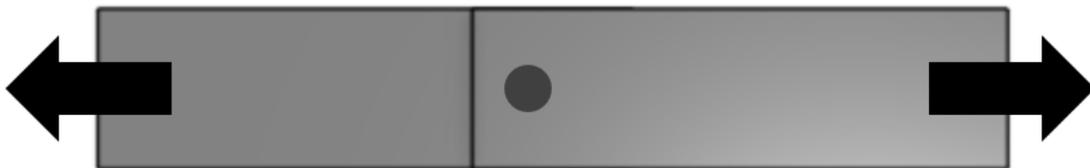


Figura 21 - schema dello shear test [3]

Così facendo, all'interno del materiale e in particolare nella zona dove si trova il giunto inizia a generarsi uno stato di sforzo del materiale. Giunti a rottura del punto di saldatura la macchina si ferma e misura la forza applicata per raggiungere questo risultato che non è altro che la massima forza che può sopportare il giunto.

*“Therefore, the mechanical strength can be used as a factor to define the critical level of electrode wear. For instance, when the mechanical strength of weld spots reduces of 20% with respect to the initial value, the electrode can be considered worn and to be replaced”.*⁸

Un elettrodo si può considerare usurato quando la forza meccanica che può sostenere il punto di saldatura si riduce del 20% rispetto ai valori iniziali. Certo è che poi l'elettrodo volendo potrebbe essere ancora utilizzato per ulteriori saldature però la qualità del giunto non sarebbe più garantita.

Quindi per prima cosa deve essere valutata la forza meccanica del giunto all'inizio della campagna sperimentale quando l'elettrodo è ancora quasi inutilizzato. Inseguito poi le prove di trazione vengono eseguite ogni volta che viene completata una coppia di lastre metalliche da saldare ossia ogni 135 punti.

Comunque, ogni volta che vengono fatte le prove di trazioni, vengono eseguite almeno 3 ripetizioni. Questo perché la frequenza dei dati che vengono raccolti è già abbastanza bassa quindi non ci si può permettere di avere la presenza di outlier o comunque di punti o difetti che andrebbero a invalidare un'informazione molto importante. La frequenza, infatti, non è come per la carta carbone di 1 misurazione ogni 15 punti di saldatura ma di 1 misurazione ogni foglio. Quindi se si prendesse e si preparasse un singolo provino in caso di difetti o di outlier si andrebbero a perdere dati, non su 15 saldature come per la carta carbone, ma su 135 punti di saldatura andando così ad inficiare la qualità dell'analisi.

Infine, quindi, con il primo test di trazione, a elettrodo nuovo, viene trovata la forza massima meccanica che il giunto può sostenere e questo valore è stato poi utilizzato come parametro per stabilire il fine vita dell'elettrodo.

⁸ Data-Drive framework for Electrode Wear Prediction in Resistance Spot Welding

4. Misurazione dell'usura

4.1 Metodologia di misurazione

Dopo una lunga e corposa campagna sperimentale, volta alla raccolta dati, ci si concentra adesso sulla loro analisi e quindi sulle misurazioni di usura dell'elettrodo.

Adesso infatti si passa all'analisi delle caratteristiche fisiche che caratterizzano l'usura dell'elettrodo all'aumentare dei punti di saldatura. Il dato più importante a nostra disposizione per questo tipo di analisi sono le impronte della superficie di contatto dell'elettrodo registrate con il metodo della carta carbone. Per elaborare questo tipo di dato nel modo più oggettivo possibile e per evitare errori umani nella misurazione delle caratteristiche è stato necessario passare attraverso dei tool di processamento dell'immagine. Al di là di come si è soliti pesare, il processamento dell'immagine non è relegato solo alla loro modifica (Photoshop o altri programmi) ma può essere utilizzato per estrarre dati e misure molto importanti, in questo caso, per la nostra ricerca.

Quindi, per prima cosa il foglio bianco utilizzato per raccogliere le impronte della faccia dell'elettrodo tramite la carta carbone è stato convertito in formato digitale tramite l'uso di uno scanner.

Il programma utilizzato per il processamento dell'immagine è stato Matlab e nello specifico un particolare toolbox ossia MATLAB Image processing toolbox e più nello specifico una sua applicazione che è MATLAB Image Region Analyzer.

"Image Processing Toolbox™ fornisce una serie completa di algoritmi standard di riferimento e applicazioni di workflow per l'analisi, la visualizzazione e l'elaborazione di immagini e lo sviluppo di algoritmi. È possibile eseguire attività di segmentazione di immagini, miglioramento delle immagini, riduzione del rumore, trasformazione geometrica e registrazione di immagini utilizzando tecniche di Deep Learning e di

elaborazione di immagini tradizionale. Il toolbox supporta l'elaborazione di immagini 2D, 3D e di dimensioni arbitrarie."⁹

Oltre a caricare l'immagine su Matlab l'applicazione che abbiamo usato richiedeva un'immagine in 2d ossia un'immagine in bianco e nero mentre quella a nostra disposizione era un'immagine in scala di grigi che quindi non poteva adattarsi ai requisiti richiesti. Quindi è stato scritto un piccolo algoritmo con il quale prima si caricava l'immagine sul programma e poi questa veniva elaborata e portata in formato 2d.

Detto questo però non tutti i dati forniti dall'elaboratore saranno utili ma si dovrà andare a fare una selezione per andare a eliminare tutte le informazioni inutili. Questo però non può essere fatto direttamente dal sistema informativo ma deve essere fatto a mano. Per agevolare, quindi, questo tipo di lavoro oltre a caricare l'immagine e a trasformarla in formato bianco e nero si è voluto anche operare un'inversione di colori così che i dati da eliminare risultassero più evidenti all'occhio umano che, come ben sappiamo, in casi di questo tipo è ben più fallibile di una macchina.

Una volta caricata l'immagine a colori invertiti si è potuto procedere con l'utilizzo dell'app Image Region analyzer che ha consentito la misurazione di numerose caratteristiche legate alle impronte.

È necessario specificare, però, come ci si poteva aspettare, essendo un'app di processamento delle immagini le unità di misura delle caratteristiche prese in considerazione sono i pixel e solo in seguito è stata poi operata una conversione nel sistema internazionale di unità di misura anche perché in assenza di questo passaggio i dati sarebbero stati abbastanza incomprensibili e avrebbero dato non pochi problemi nelle future analisi.

num welds	id weld	Area	Major Axis Length	Minor Axis Length	Eccentricity	Orientation	Euler Number	Equivalent Diameter	Perimeter	Circularity	filled area	Convex area	solidity	extent
78	E1	5313	86,0113	78,7804	0,4013	-3,7424	-3	82,2479	291,7720		5317	5481	0,9692	0,7730
93	F1	5118	83,3762	78,3289	0,3426	-53,6422	-1	80,7245	302,9540		5121	5310	0,9638	0,7612
108	G1	5635	86,6644	83,0219	0,2869	21,4693	-10	84,7036	286,2640		5650	5777	0,9754	0,7711

Figura 22 – esempio di dati raccolti tramite Matlab

⁹ (<https://it.mathworks.com/products/image.html>)

Come si può evincere anche solo dalla visione del Major Axis length, la lettura di dati di questo tipo non permette un'agevole interpretazione delle informazioni riportate. Allora è stata operata una conversione da pixel a mm che ha portato al seguente database sul quale poi sono state fatte una serie di analisi.

num welds	id weld	Area	Major Axis Length	Minor Axis Length	Eccentricity	Orientation	Euler Number	Equivalent Diameter	Perimeter	Circularity	filled area	Convex area	solidity	extent
78	E1	38	7,2832	6,6709	0,4013	-3,7424	-3	6,9645	24,7065	0,7843	38	39	0,9693	0,7730
93	F1	37	7,0601	6,6327	0,3426	-53,6422	-1	6,8355	25,6534	0,7007	37	38	0,9638	0,7612
108	G1	40	7,3385	7,0301	0,2869	21,4693	-10	7,1725	24,2401	0,8641	41	41	0,9754	0,7711

Figura 23 – Esempio di dati elaborati dopo essere stati esportati da Matlab

4.2 Caratteristiche misurate

Come si evince dalle tabelle precedenti, varie sono state le misure che sono state prese in considerazione.

- Area di contatto: numero di pixel che si trova all'interno della regione analizzata
- Major axis length: lunghezza in pixel dell'asse maggiore dell'ellisse contenuto all'interno dell'impronta analizzata
- Minor axis length: lunghezza in pixel dell'asse minore dell'ellisse contenuto all'interno dell'impronta analizzata
- Eccentricity: è l'eccentricità dell'ellisse contenuto all'interno dell'impronta. È definito anche come il rapporto tra la distanza dei due fuochi dell'ellisse e il suo asse maggiore. Di conseguenza il valore sarà sempre un numero compreso tra 0 e 1. Un ellisse con eccentricità uguale a 0 è una circonferenza mentre un ellisse con eccentricità uguale a 1 è un segmento retto.
- Orientation: angolo compreso tra l'asse maggiore dell'ellisse e l'asse x
- Euler Number: è calcolato come il numero di oggetti nella regione meno il numero di buchi nella regione

- Equivalent diameter: come suggerisce il termine è il diametro (in pixel) di un immaginario cerchio che ha la stessa area della regione presa in considerazione
- Perimeter: mi restituisce il numero di pixel che si trovano attorno al contorno della regione presa in considerazione
- Circularity: è un fattore di forma che viene calcolato come il rapporto tra l'area di contatto dell'elettrodo e l'area di un immaginario cerchio avente perimetro equivalente al perimetro dell'impronta analizzata
- Filled Area: è il numero di pixel contenuti nella filledImage. Per chiarezza la filledImage non è altro che l'immagine (l'impronta) analizzata con tutti i buchi riempiti (da pixel). L'impronta lasciata dall'elettrodo sulla carta carbone raramente è perfetta, più spesso infatti sono presenti dei buchi che nella filledImage sono individuati e coperti con dei pixel.
- Convex area: numero di pixel all'interno della ConvexImage. L'impronta lasciata dall'elettrodo può presentare delle zone concave che nella ConvexImage vengono riempite da pixel.
- Solidity: è una proporzione dei pixel che ci sono nella regione (letteralmente sarebbe scafo) convessa e che di conseguenza sono presenti anche nella regione. È calcolato come $\text{Area}/\text{Convex Area}$.
- Extent: è il rapporto tra i pixel che sono nella regione e i pixel che ci sono in tutto il riquadro. Calcolato come $\text{Area}/\text{Area Bounding Box}$ (ossia di tutto il riquadro).

4.3 Analisi delle caratteristiche misurate

Con l'attenzione rivolta alla ricerca di un indicatore di usura dell'elettrodo le principali misurazione geometriche sopra riportate sono state rapportate nei seguenti grafici al numero di saldature eseguite in modo da cercare di evidenziare eventuali trend.

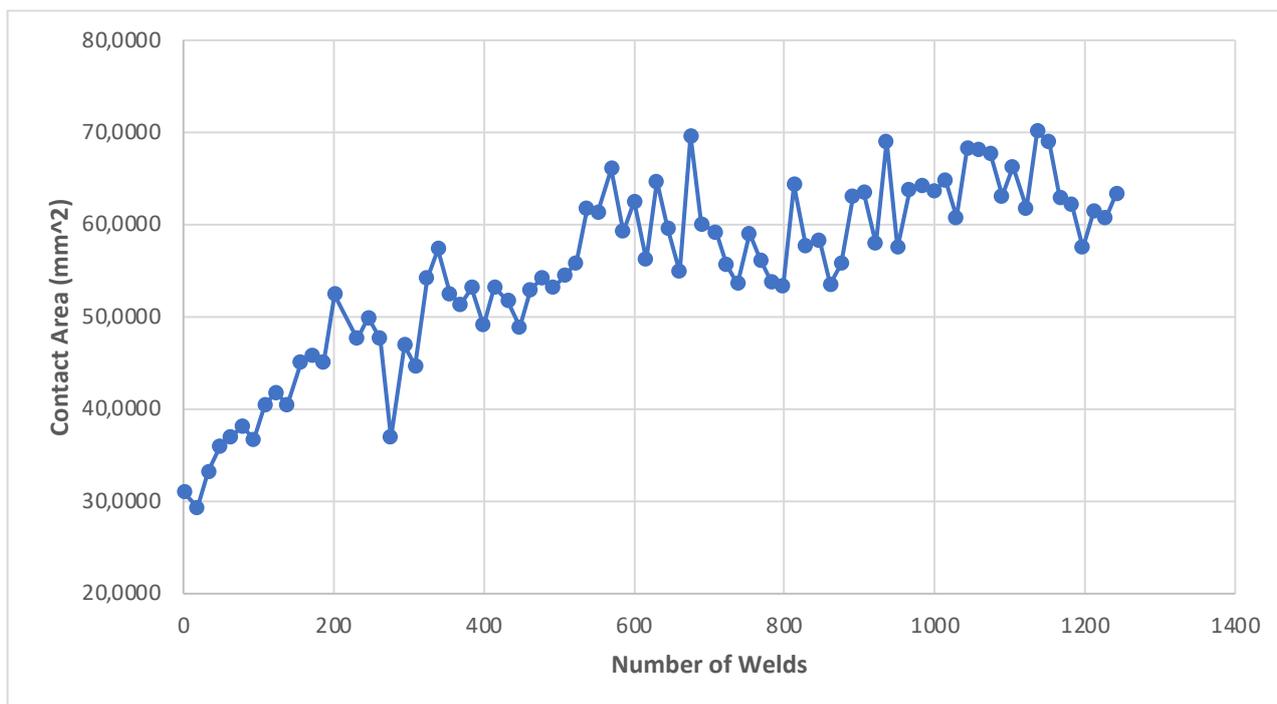


Figura 24 - grafico dell'area di contatto rispetto al numero di saldature

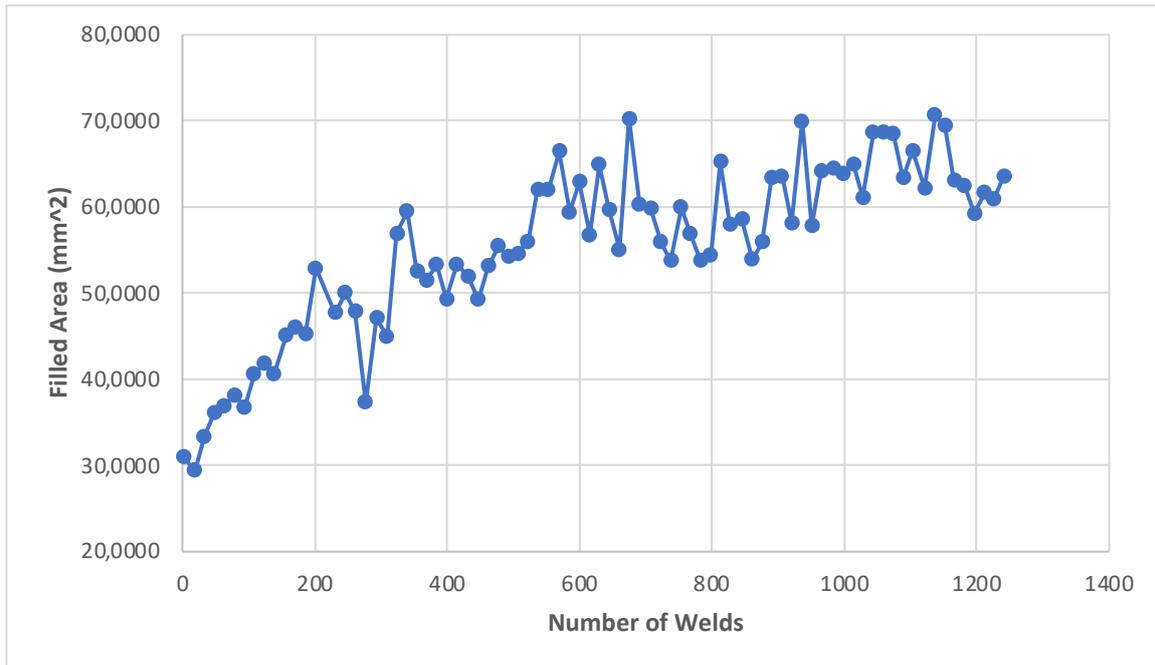


Figura 25 - grafico della filled area rispetto al numero di saldature

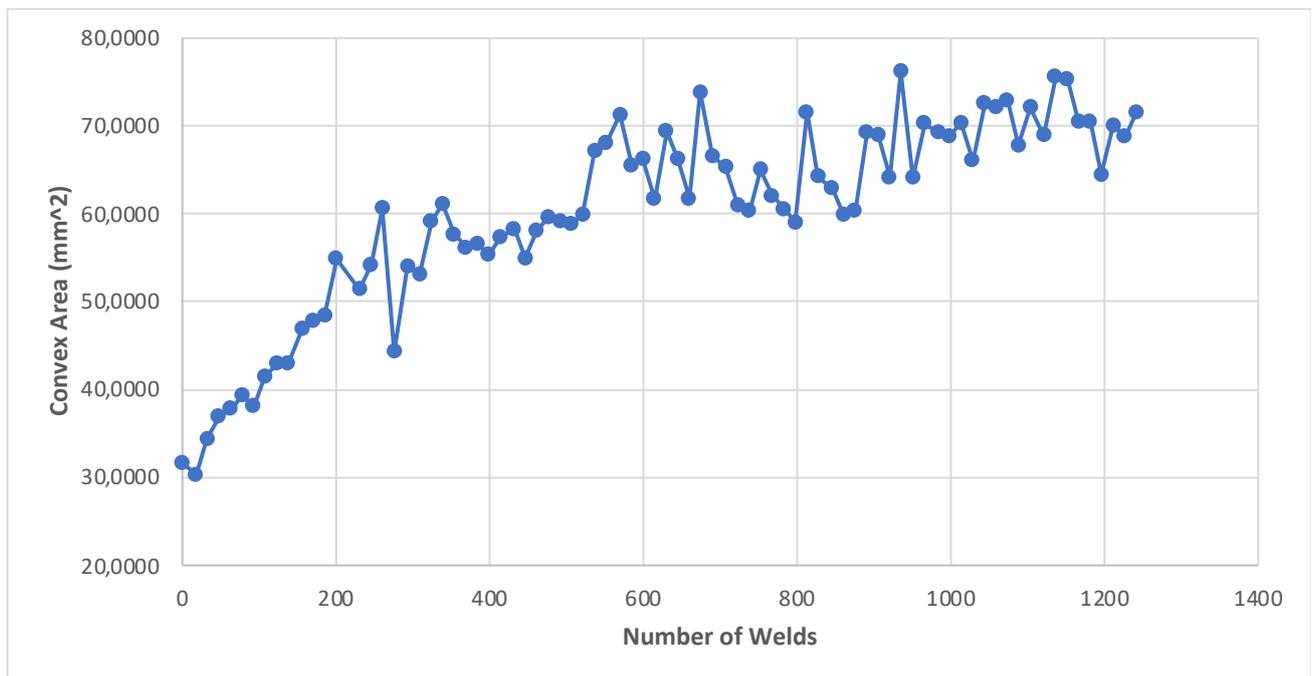


Figura 26 - grafico della convex area rispetto al numero di saldature

Come si può evincere dai grafici, si può vedere un sostanziale aumento dell'area dell'impronta all'aumentare del numero di saldature. Questo è causato dalla

deformazione meccanica della faccia dell'elettrodo che, come abbiamo già detto in precedenza, può poi influire sulla qualità del giunto.

“The contact area increases over time because of the plastic deformation at elevated temperatures of the electrode face (Fig. 8a). Initially, the contact area increases with low variability and a steep rate, then, as the pitting zones formed and grew, the variability becomes larger whereas the rate reduces.”¹⁰

Se l'area dell'impronta lasciata dalla superficie di contatto dell'elettrodo aumenta ne deve conseguire che anche la lunghezza degli assi maggiore e minore degli ellissi corrispondenti e il diametro equivalente devono aumentare di dimensioni. Di questa supposizione ne si può prendere evidenza dai grafici sottostanti.

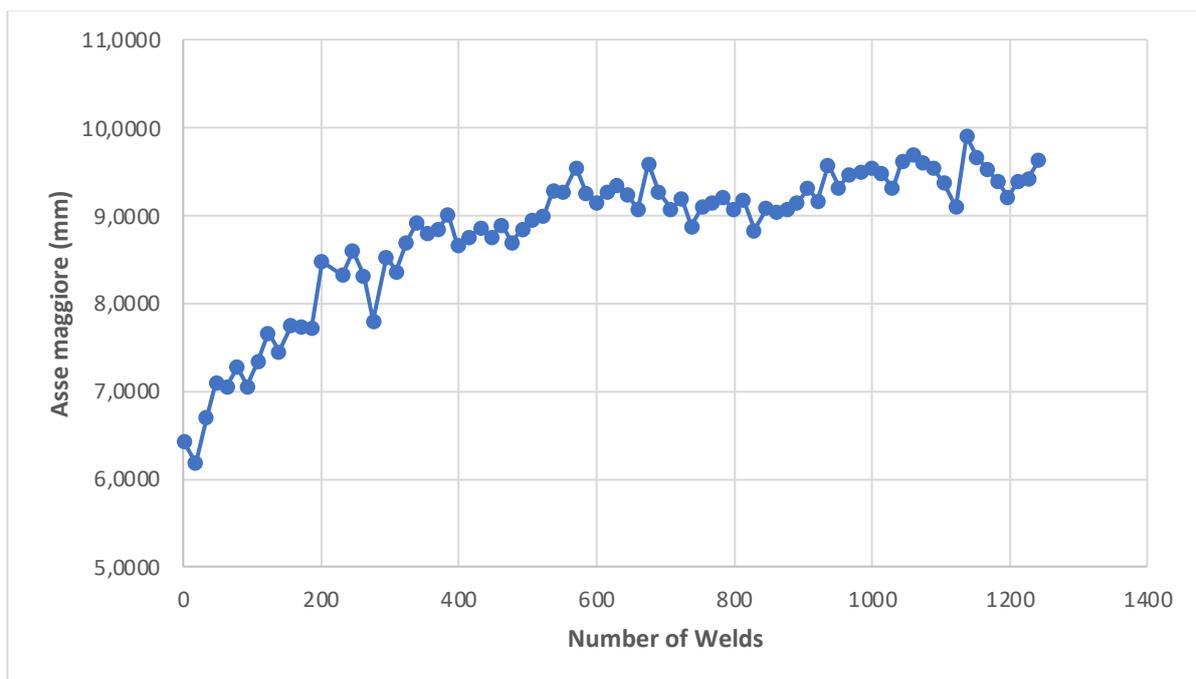


Figura 27 - grafico dell'asse maggiore rispetto al numero di saldature

¹⁰ Use of electrode displacement signals for electrode degradation assessment | resistance spot welding

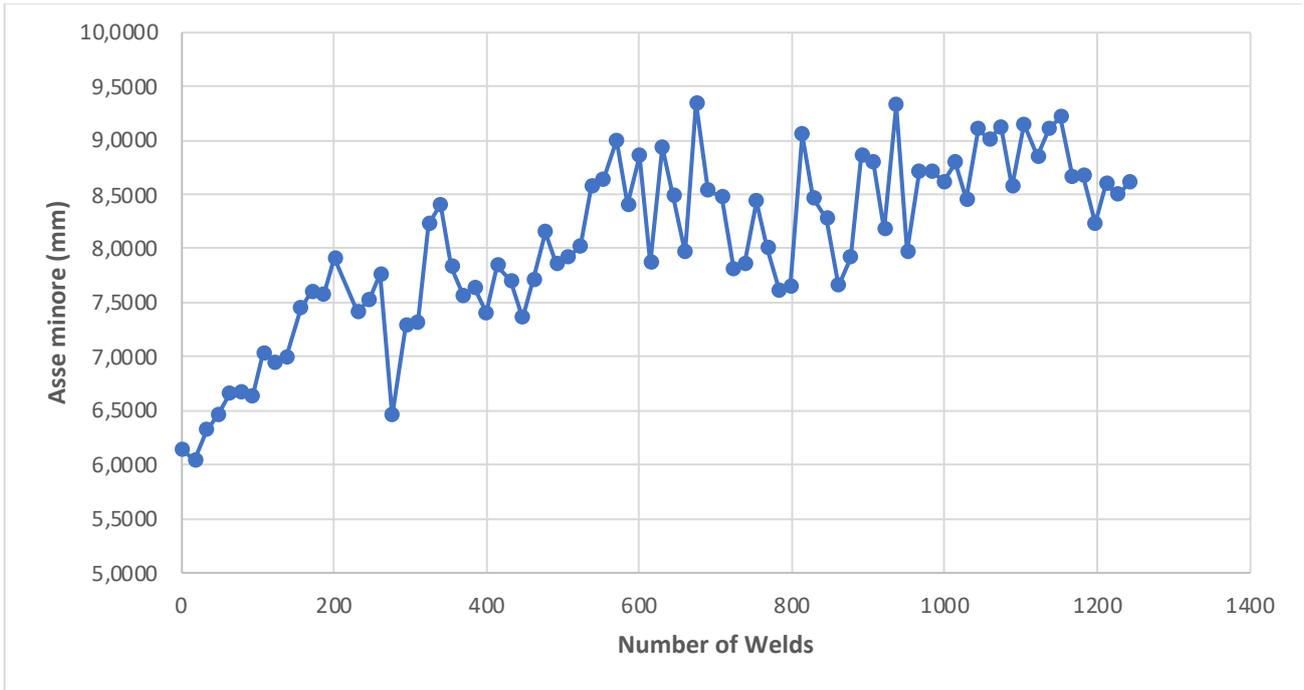


Figura 28 - grafico dell'asse minore rispetto al numero di saldature

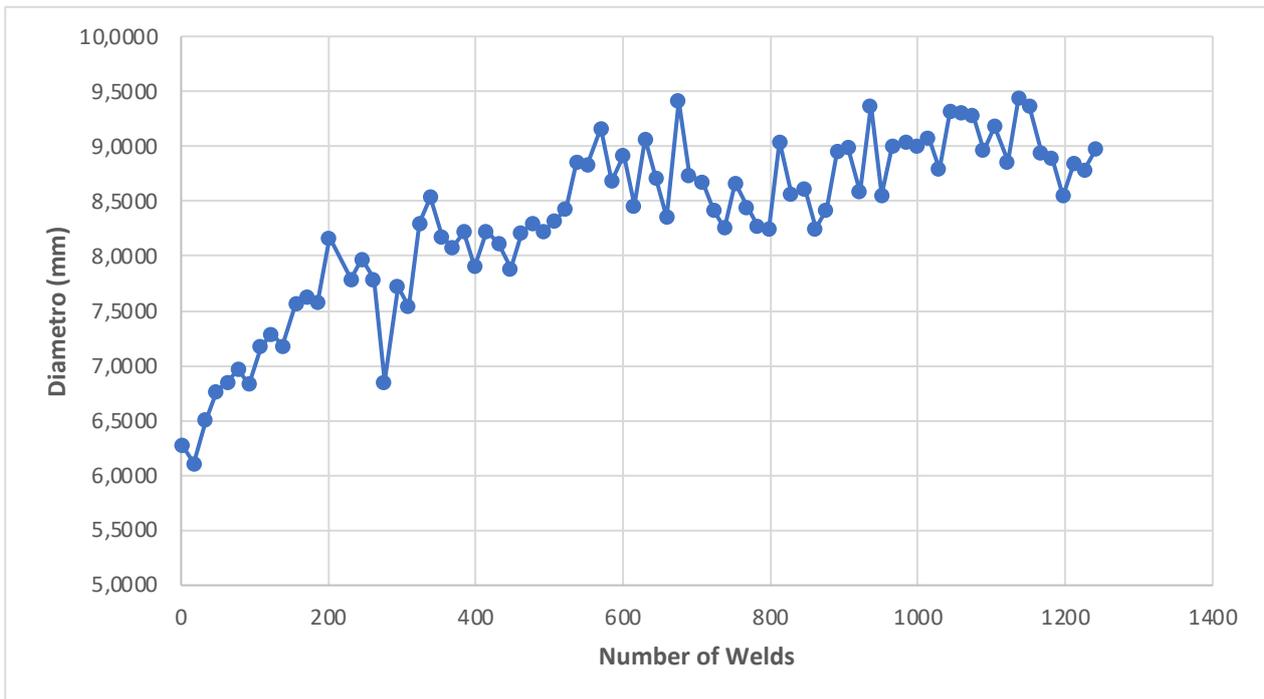


Figura 29 - grafico del diametro rispetto al numero di saldature

Se all'aumentare del numero di saldature la superficie di contatto dell'elettrodo si deforma sempre di più, allora ci si aspetta che il suo fattore di circolarità tenda invece

a diminuire con l'aumento dei punti eseguiti ed è proprio questo che si evince dal grafico seguente.

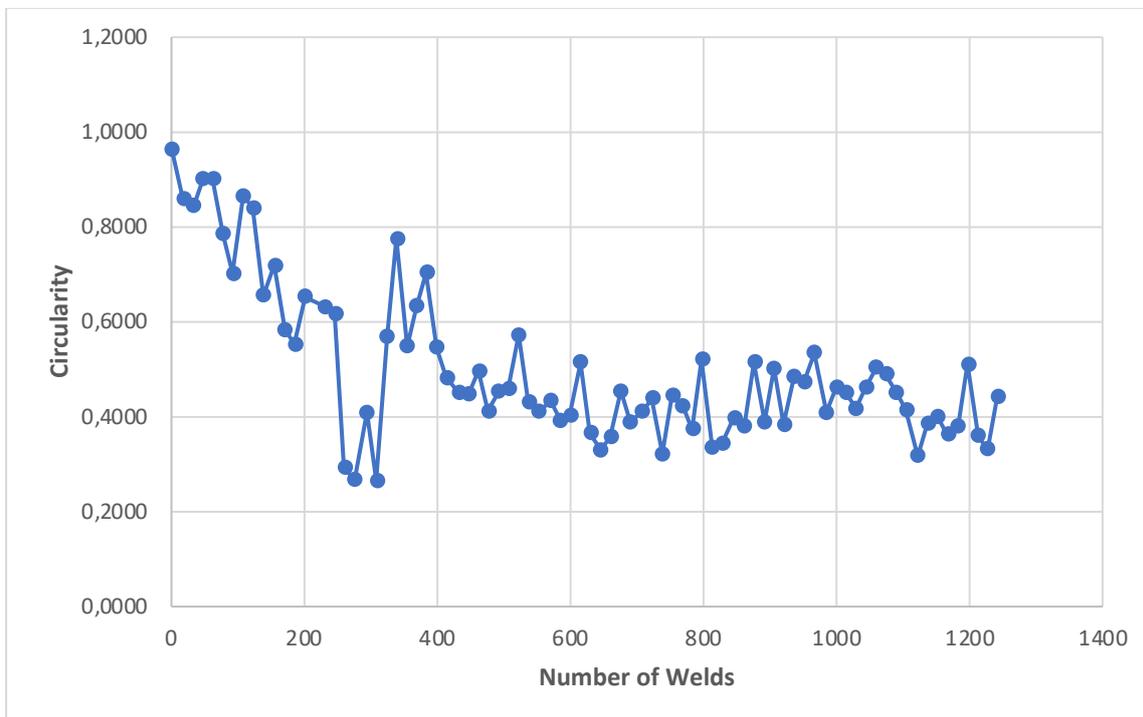


Figura 30 - grafico della circularity rispetto al numero di saldature

Un altro grafico molto interessante da mostrare è quello che rapporta la forza di trazione e l'area di contatto dell'elettrodo perché evidenzia una particolare caratteristica.

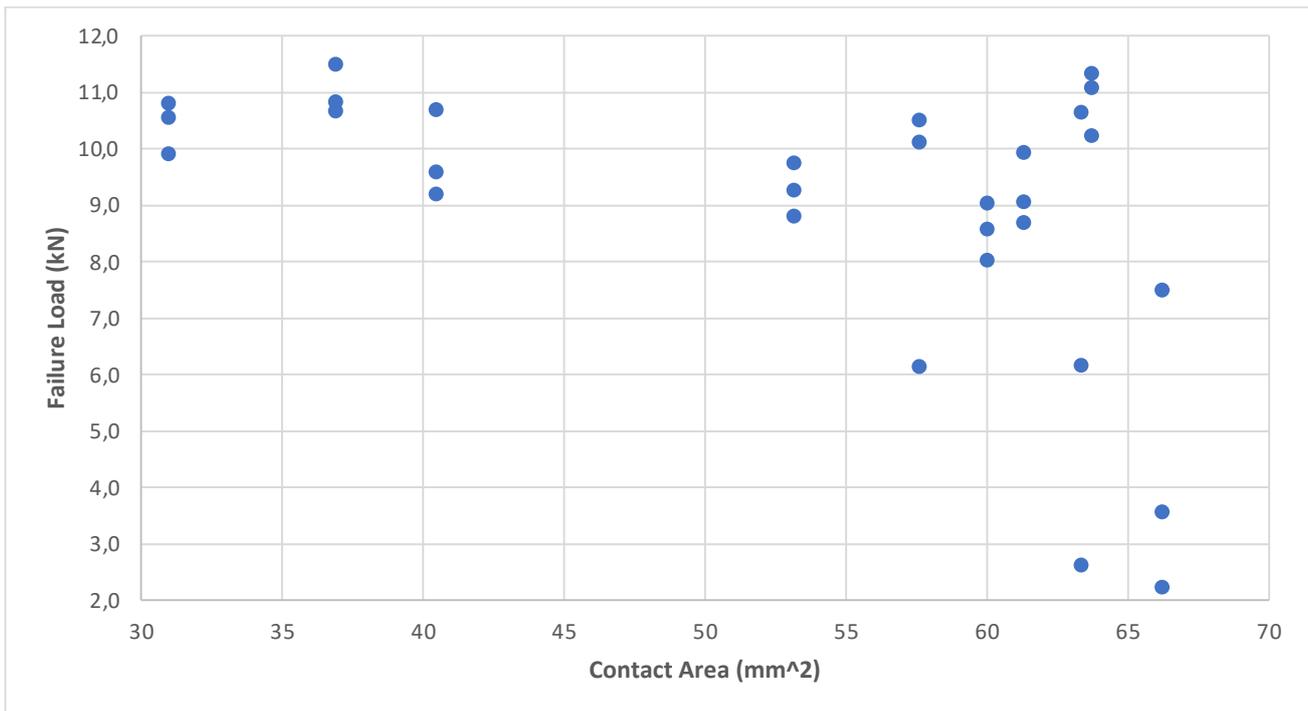


Figura 31 - grafico del failure Load rispetto alla contact area

“As stated by some studies [25,26,27] the slight irregularity in the thermal power distribution would promote the formation of larger weld nuggets with a corresponding increase of weld strength, as shown in Fig. 8b for a contact area of 47.5 mm² (about no. 275 spot of shear test results, Fig. 6). Nevertheless, when the pitting areas enlarge, with the concurrent oxidation and plastic deformation of the electrode tip, the uneven thermal power distribution reduces continuously the nugget size and the failure load of the spot welds.”¹¹

È interessante notare come, all’inizio, l’aumentare dell’area di contatto dell’elettrodo produce addirittura un aumento della qualità del giunto e quindi della forza che può sopportare. Questo fenomeno, però, non dura nel tempo perché all’aumentare ulteriore del numero delle saldature e della deformazione e ossidazione della faccia dell’elettrodo la qualità del giunto inizia a diminuire poi sempre di più.

¹¹ Use of electrode displacement signals for electrode degradation assessment I resistance spot welding

Per ultimo mostro il grafico della forza di trazione all'aumentare del numero di saldature.

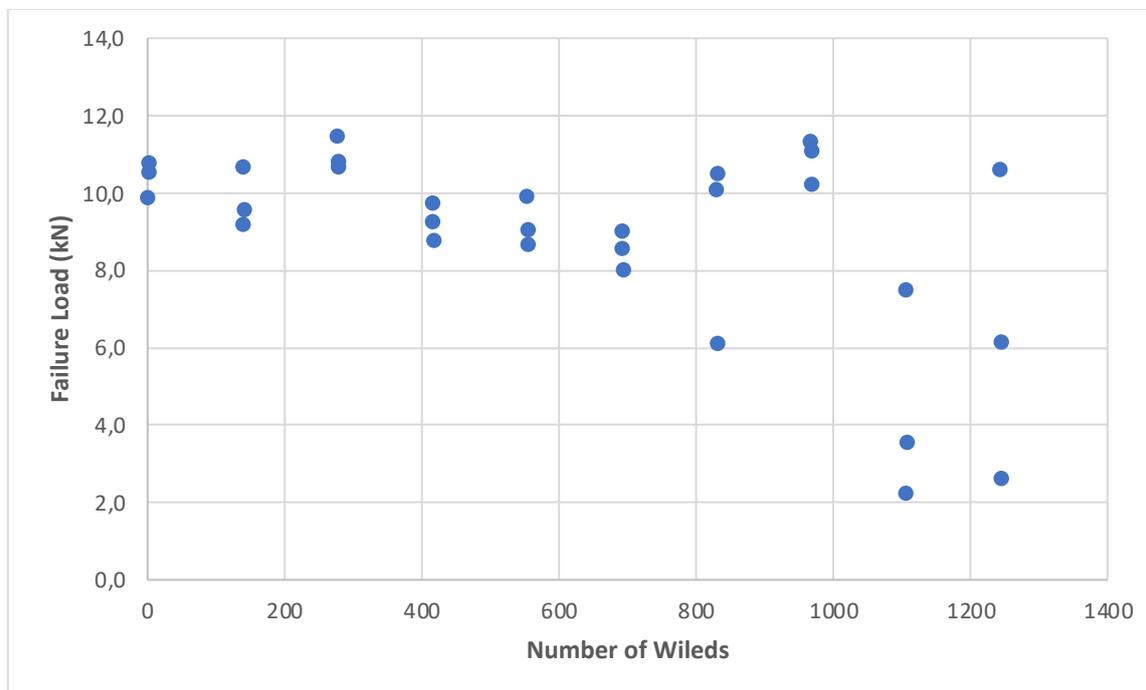


Figura 32 - grafico del Failure Load rispetto al numero di saldature

Come si può vedere, all'aumentare del numero di saldature diminuisce la forza che può sopportare il giunto fino poi ad arrivare al fallimento del punto di giuntura. È, inoltre, evidente che dopo i 1000 punti il processo di saldatura diventa estremamente instabile e ne è una dimostrazione la forte variabilità di valori nello shear test.

5. Ricerca di un KPI

5.1 Cosa si intende per KPI

Lo scopo dello studio su cui si concentra questo elaborato è quello di andare alla ricerca di un indicatore che ben si presta alla descrizione dell'andamento della resistenza a trazione di un punto di saldatura e quindi che riesca a monitorare lo stato di usura dell'elettrodo in modo da poter intervenire in tempo utile per poterlo sostituire.

I KPI (Key performance indicator) sono degli indici che si pongono l'obiettivo di descrivere nel miglior modo possibile l'andamento di un processo aziendale.

I KPI non sono specifici di un singolo settore ma sono utilizzati in qualsiasi ambito si voglia monitorare e tenere sotto controllo un processo. Infatti, possono essere utilizzati nei settori più svariati come la contabilità, il marketing (digitale e non), nel settore manifatturiero, nel controllo delle performance di qualità o anche solo nel monitoraggio dei magazzini. Poi inseguito a partire da un singolo settore si possono creare svariati KPI a seconda della specifica prestazione che si vuole controllare nel tempo.

*"KPIs are not only a performance control tool but also a planning tool that helps to plan future activities with a view to continuous improvement: deviations between expected objectives and obtained results are what management aims to minimize."*¹²

I KPI, quindi, non sono solo degli strumenti di controllo ma possono, e anzi devono, essere utilizzati per pianificare le attività future in un'ottica di progressivo e continuo miglioramento. Nel nostro caso, in particolare, l'obiettivo è quello di tenere sotto controllo l'usura dell'elettrodo in modo da pianificare in anticipo la sua sostituzione andando così a diminuire i difetti e i conseguenti costi derivanti da punti di saldatura non eseguiti correttamente.

¹² Development of a key performance indicator framework for automated warehouse systems

5.2 Stato dell'arte

Come già indicato nei capitoli precedenti, la base di partenza per la ricerca di un indicatore utile al nostro scopo sono le misurazioni eseguite tramite Matlab sulle impronte lasciate sulla carta carbone dalla superficie di contatto dell'elettrodo.

Fino ad ora, in letteratura l'area di contatto della faccia dell'elettrodo, (ossia l'area dell'impronta lasciata dalla carta carbone), è stata utilizzata come indicatore di usura dell'elettrodo.

Come già detto in precedenza, l'area di contatto aumenta sempre di più all'aumentare del numero di saldature a causa della deformazione plastica.

Come si può evincere poi dal grafico in figura, il raggiungimento di aree sufficientemente grandi (attorno ai 62 mm^2) il processo di saldatura diventa del tutto instabile rendendo quindi necessaria la sostituzione dell'elettrodo.

*"When the electrode tip is seriously worn, after about 1000 weld spots, the welding process is totally instable and the weld nugget size, and hence the mechanical strength of the spot welds, cannot be controlled at all. The instability occurs when the contact area overcomes 62 mm^2 (2.2 times greater than the initial contact area)."*¹³

Proseguendo nello studio di questo tipo di indicatore, si è andato a calcolare l'indice di correlazione di Pearson per vedere quanto effettivamente (nel nostro caso) l'area di contatto e la forza di trazione potessero essere correlate linearmente.

L'indice di Pearson può assumere dei valori [-1 ; + 1] che vanno da -1 a 1. Con -1 se c'è una perfetta correlazione lineare negativa e 1 se c'è una perfetta correlazione lineare positiva. Se invece il coefficiente di Pearson assume valori intorno allo 0 allora significa che i due dati non presentano alcuna correlazione (per lo meno lineare).

¹³ Use of electrode displacement signals for electrode degradation assessment I resistance spot welding

È stata quindi utilizzata la formula:

$$\rho_{XY} = \frac{COV(XY)}{\sigma_X \sigma_Y}$$

(6)

Dove:

- X è l'area di contatto
- Y la forza di trazione
- ρ_{XY} è il coefficiente di correlazione o indice di Pearson che indica quanto sono correlati linearmente l'area di contatto e la forza di trazione
- COV(XY) è la covarianza tra X e Y
- σ_X è la varianza dell'area di contatto
- σ_Y è la varianza della forza di trazione

Il risultato ottenuto indica che l'indice di correlazione di Pearson tra area di contatto e forza di trazione è $\rho_{XY} = -0,487$ ossia presentano una moderata correlazione negativa. Questo valore è già un buon risultato in quanto significa che l'area di contatto riesce a spiegare al 49% l'andamento della forza di trazione e quindi dell'usura dell'elettrodo.

5.2 Ricerca di un nuovo indicatore di usura e risultato intermedio

Partendo da questi presupposti, lo studio di questo elaborato è volto alla ricerca di ulteriori indicatori che possano rappresentare con una precisione migliore l'andamento della forza di trazione.

Studi sull'area di contatto sono già stati pubblicati, quindi in questo caso l'attenzione è stata rivolta anche a tutte le altre misurazioni effettuate tramite Matlab. L'idea di partenza è infatti quella di aggregare alcune misure effettuate per dare origine a un efficace indicatore di usura dell'elettrodo.

Per poter però aggregare misure diverse, con unità di misura diversa, è stato necessario operare una normalizzazione in riferimento al valore massimo in modo tale da ottenere dei valori che fossero adimensionali e che potessero così essere trattati insieme.

La formula utilizzata per la normalizzazione è la seguente:

$$y_i = \frac{x_i}{\max x_i}$$

(7)

Dove:

- y_i è il valore i-esimo adimensionale ottenuto dividendo il valore i-esimo per il massimo dei valori della misura considerata
- x_i è il valore i-esimo nella sua unità di misura
- $\max x_i$ è il valore massimo tra i valori registrati della misura presa in considerazione

In questo modo tutti i dati che si è andati a trattare oltre a essere adimensionali assumono anche valori compresi tra 0 e 1.

Riporto di seguito, a titolo esemplificativo, una tabella con alcune misurazioni normalizzate.

num welds	Area	Major Axis Length	Minor Axis Length	Eccentricity	Orientation	Euler Number	Equivalent Diameter	Perimeter	Circularity	filled area	Convex area	solidity	extent
78	0,54386324	0,735231234	0,714187545	0,71329541	-0,0424251	0,103448276	0,737470747	0,499268479	0,81552635	0,53968737	0,51653944	0,99039542	0,98034242
93	0,52390214	0,712705797	0,710094184	0,60895841	-0,6081104	0,034482759	0,723811274	0,518402667	0,72867238	0,51979294	0,50042409	0,98477572	0,9653773
108	0,57682465	0,740813646	0,752639119	0,50995379	0,24338507	0,344827586	0,75948963	0,489843412	0,89855747	0,57348762	0,54443502	0,99662818	0,97793278

Figura 33 -esempio di tabella di misurazioni normalizzate

Come si può evincere dall'immagine, oltre a normalizzare tutti i valori è stata anche eseguita un'analisi sui coefficienti di Pearson per capire quali misurazioni potevano essere più correlate alla forza di trazione.

Da una prima analisi la misurazione che appare più correlata all'usura dell'elettrodo è il Minor Axis Length ossia la misura dell'asse minore dell'immaginario ellisse costruito sulla forma dell'impronta.

Questo tipo di misura, però, anche se viene calcolata tramite Matlab (sulla base del numero di pixel disposti lungo l'asse minore) sarà strettamente correlata all'area di contatto e quindi non verrebbero aggiunte molte informazioni nuove a quelle già presenti in letteratura. Per essere sicuri però dell'effettiva presenza di una correlazione tra area di contatto e si è andati a costruire una matrice di correlazione tra tutte le varie misurazioni.

	area	Major Axis Length	Minor Axis Length	Eccentricity	Euler Number	Equivalent Diameter	Perimeter	Circularity	filled area	Convex area	Fmax (kN)
area	1	0,969702747	0,993880045	-0,2258786	0,75232963	0,999131351	0,76507251	-0,5350513	0,99992628	0,99246894	-0,4866269
Major Axis Length	0,96970275	1	0,944052526	0,01130461	0,74156312	0,973740332	0,84609254	-0,6760156	0,97062129	0,98711779	-0,4216926
Minor Axis Length	0,99388005	0,944052526	1	-0,3170645	0,75482475	0,992962287	0,75475821	-0,5160439	0,99382965	0,98005592	-0,5047826
Eccentricity	-0,2258786	0,011304608	-0,317064485	1	-0,165449	-0,209080041	0,11912677	-0,3565447	-0,2231267	-0,1380383	0,36422331
Euler Number	0,75232963	0,741563123	0,754824752	-0,165449	1	0,756444887	0,71719872	-0,5968592	0,75736373	0,77541657	-0,2333085
Equivalent Diameter	0,99913135	0,973740332	0,992962287	-0,20908	0,756444889	1	0,77471287	-0,5535091	0,99911194	0,99263916	-0,4773833
Perimeter	0,76507251	0,846092538	0,754758212	0,11912677	0,71719872	0,774712869	1	-0,935837	0,76986071	0,8252794	-0,3605805
Circularity	-0,5350513	-0,676015564	-0,516043949	-0,3565447	-0,5968592	-0,55350913	-0,935837	1	-0,5410121	-0,6170567	0,21044213
filled area	0,99992628	0,97062129	0,99382965	-0,2231267	0,75736373	0,999111935	0,76986071	-0,5410121	1	0,99332161	-0,4835041
Convex area	0,99246894	0,987117787	0,980055921	-0,1380383	0,77541657	0,992639163	0,8252794	-0,6170567	0,99332161	1	-0,4668969
Fmax (kN)	-0,4866269	-0,421692566	-0,504782639	0,36422331	-0,2333085	-0,477383257	-0,3605805	0,21044213	-0,4835041	-0,4668969	1

Figura 34 - matrice di correlazione

Come da previsioni, infatti, Lunghezza dell'asse minore e area di contatto presentano una correlazione positiva quasi perfetta: l'indice di Pearson ha un valore di 0,993).

Questo tipo di misurazioni sono, inoltre, entrambe di tipo dimensionale.

Partendo allora da questi dati si è pensato di volgere l'attenzione invece a delle misure di forma anziché dimensionali e che avessero un coefficiente di correlazione con l'area di contatto molto più basso.

Da qui allora l'idea di aggregare la misura di Eccentricity e di Circularity: entrambi, infatti, sono fattori di forma e sono poco correlati all'area di contatto.

Prima di procedere con l'aggregazione però si è tenuto conto del fatto che l'Eccentricity presenta una correlazione maggiore (0,364) con la forza di trazione rispetto alla Circularity (0,21).

Detto questo, come metodi di aggregazione si è pensata a una media pesata che desse un peso leggermente maggiore (0,6) all'eccentricity e uno leggermente minore alla circularity (0,4).

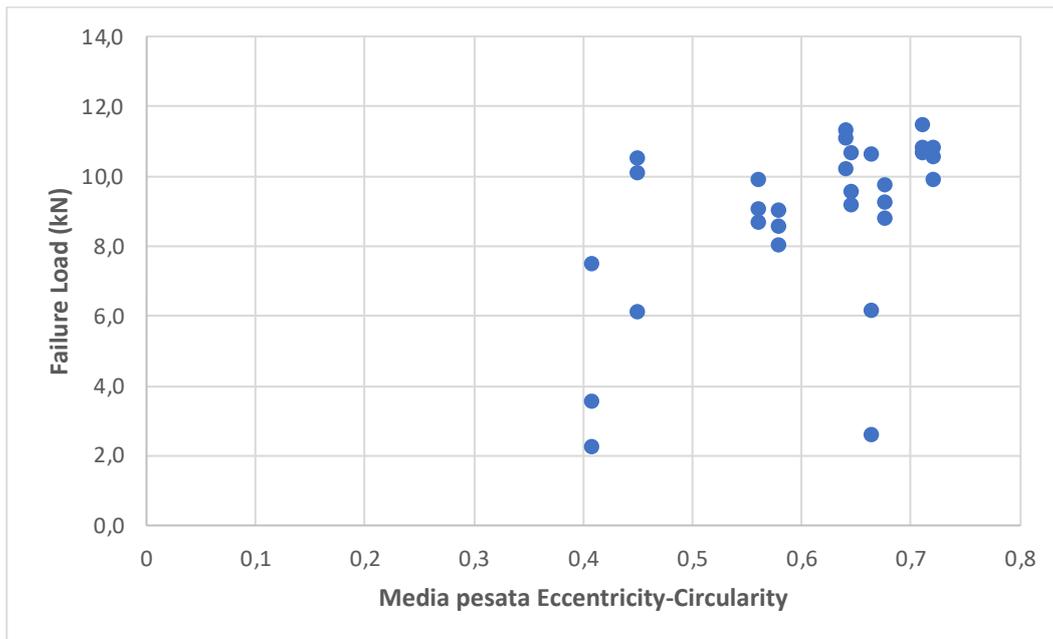
Nwelds	Fmax (kN)	media pesata ecc circ
1	9,9	0,720619658
2	10,8	0,720619658
3	10,6	0,720619658
139	9,2	0,645111841
140	10,7	0,645111841
141	9,6	0,645111841
277	11,5	0,711026054
278	10,7	0,711026054
279	10,8	0,711026054
415	9,3	0,675507719
416	9,7	0,675507719
417	8,8	0,675507719
553	9,9	0,560557066
554	9,1	0,560557066
555	8,7	0,560557066
691	9,0	0,579157679
692	8,6	0,579157679
693	8,0	0,579157679
829	10,1	0,4490211
830	10,5	0,4490211
831	6,1	0,4490211
967	11,3	0,640646439
968	10,2	0,640646439
969	11,1	0,640646439
1105	7,5	0,408100594
1106	2,2	0,408100594
1107	3,6	0,408100594
1243	10,6	0,66407373
1244	6,2	0,66407373
1245	2,6	0,66407373
	pearson	0,515024293

Figura 35 - indice di correlazione tra Failure Load e media pesata di eccentricity e circularity

In questo modo si è ottenuto un indicatore che fosse più correlato rispetto all'area di contatto: presenta infatti un indice di correlazione di Pearson di 0,515.

È stato così trovato un indicatore che spiega con una precisione maggiore, anche se di poco, l'andamento della forza di trazione.

Di seguito riporto, inoltre, anche il grafico di questo indicatore rispetto alla forza di trazione.



funzione di correlazione di Pearson è stato trovato un indice che presenta la seguente formula:

$$KPI = \frac{\beta_1 \cdot Eccentricity + \beta_2 \cdot Circularity}{\beta_3 \cdot major\ axis\ length - \beta_4 \cdot Euler\ Number}$$

(8)

Con $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ coefficienti calcolati grazie al risolutore di Excel per massimizzare la funzione di correlazione di Pearson.

In particolare, i coefficienti assumono i seguenti valori: $\beta_1 = 1,85, \beta_2 = 1,13, \beta_3 = 1,73, \beta_4 = 0,66$.

Nwelds	Fmax (kN)	indicatore
1	0,86198441	1,789318804
2	0,94036135	1,789318804
3	0,91803818	1,789318804
139	0,79957609	1,736045301
140	0,93009622	1,736045301
141	0,83346884	1,736045301
277	1	1,940772509
278	0,92895488	1,940772509
279	0,94182805	1,940772509
415	0,80625686	1,578644736
416	0,84780809	1,578644736
417	0,76552039	1,578644736
553	0,86312505	1,474847041
554	0,78816988	1,474847041
555	0,75672127	1,474847041
691	0,78654042	1,174653418
692	0,74515212	1,174653418
693	0,69871251	1,174653418
829	0,87925687	1,445253398
830	0,91461589	1,445253398
831	0,53348528	1,445253398
967	0,98598636	1,789865384
968	0,88935933	1,789865384
969	0,96464012	1,789865384
1105	0,65243584	1,045660658
1106	0,19537225	1,045660658
1107	0,31073802	1,045660658
1243	0,92504456	1,554161385
1244	0,53560355	1,554161385
1245	0,22812445	1,554161385
	pearson	0,646179271

Figura 37 - correlazione tra Failure Load e indicatore finale

Dalla tabella si può vedere come l'indicatore così trovato presenti una forte correlazione positiva con la forza di trazione. Infatti, questo indicatore presenta un indice di correlazione di Pearson pari quasi a 0,65 il che significa che può spiegare con un a precisione del 65% l'andamento della forza di trazione.

Riporto di seguito i grafici dell'indicatore rispetto alla forza di trazione e dell'indicatore rispetto al numero di saldature.

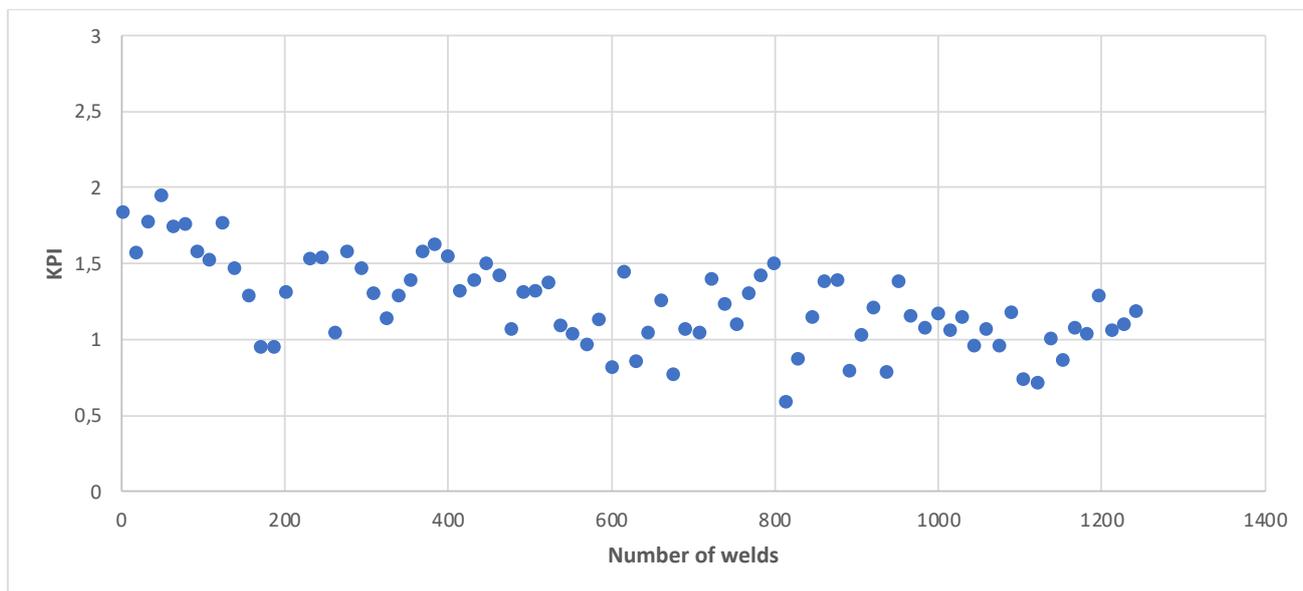


Figura 38 - grafico dell'andamento dell'indicatore finale rispetto al numero di saldature

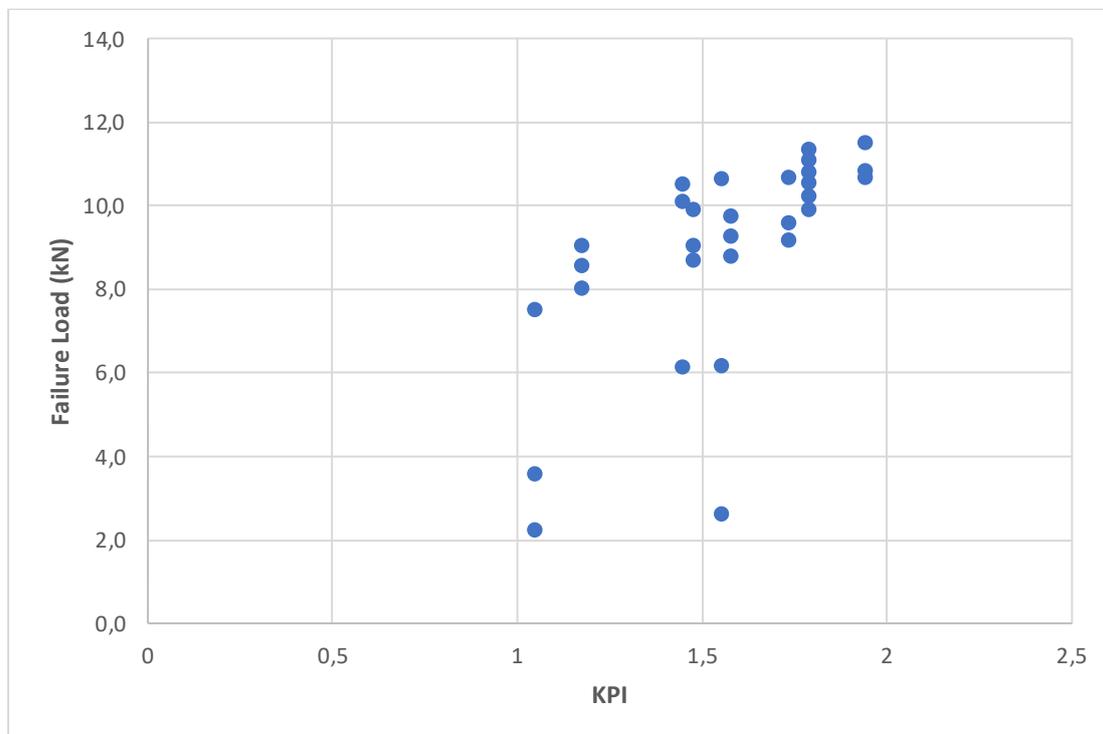


Figura 39 - grafico del Failure Load rispetto all'indicatore finale

Andando ad analizzare i precedenti grafici, si può notare una spiccata linearità dell'indicatore trovato rispetto alla forza di trazione soprattutto in prossimità di valori di forza di trazione alti. Ricordandoci sempre che valori di forza di trazione elevati spesso corrispondono (a meno di outlier) a un elettrodo poco usurato.

Quindi, l'indicatore ha un andamento lineare con il Failure load fintanto che l'elettrodo è utilizzabile ossia fino ai 700-800 punti (come si vede anche dal primo grafico). Poi l'elettrodo con l'usura diventa instabile e quindi anche l'indicatore inizia a perdere la sua correlazione di linearità. Ed è in questo momento che l'elettrodo diventa inutilizzabile e deve essere sostituito prima che porti a delle saldature che non soddisfino poi i requisiti di qualità richiesti.

Ad avvalorare ancora di più questo ragionamento è il calcolo del coefficiente di correlazione di Pearson tra l'indicatore trovato e il Failure Load relativo solamente ai punti di stabilità dell'elettrodo (ossia fino ai 700 punti di saldatura): in questo caso, infatti, il coefficiente sale fino a raggiungere un valore pari a 0,835. Questo significa che questo KPI è in grado di spiegare con una precisione di più dell'80% l'andamento della forza di trazione in condizioni di stabilità dell'elettrodo.

5.4 Assunzioni

Al fine di poter utilizzare tutti i dati delle prove di trazione per il calcolo della correlazione con l'indicatore di usura, è stato assunto che le caratteristiche di usura rimanessero invariate nell'intervallo di 3 saldature consecutive. Una possibile alternativa sarebbe potuta essere di considerare l'ispezione precedente, attuale, e successiva, delle caratteristiche di usura rispetto all'esecuzione della prova di trazione. Tale assunzione sarebbe stata comunque meno aderente alla realtà rispetto a quella adottata. Infine, una terza possibile assunzione sarebbe potuta essere di mediare le tre ripetizioni delle prove di trazione per ogni ispezione effettuata. Tale approccio

avrebbe comportato un coefficiente di correlazione calcolato sulla base di soli 10 punti, con correlazioni molto elevate come riportato nella seguente figura.

KPI	Fmax (kN)
1,7893188	10,4
1,7360453	9,8
1,94077251	11,0
1,57864474	9,3
1,47484704	9,2
1,17465342	8,5
1,4452534	8,9
1,78986538	10,9
1,04566066	4,4
1,55416139	6,5
pearson	0,80716521

Figura 40 - correlazione tra il KPI e il Failure Load (calcolato facendo la media delle 3 ripetizioni successive)

6. Conclusioni

In questo elaborato, quindi, partendo da una lunga campagna sperimentale comprendente più di 1200 punti di saldatura sono state raccolte numerosi dati in ottica Industria 4.0.

Infatti, tutte le misurazioni effettuate sono state eseguite alla volta di uno scopo ben preciso ossia quello della manutenzione predittiva.

Le impronte dell'elettrodo sono state raccolte tramite la carta carbone e poi inseguito analizzate tramite un tool di processamento delle immagini di Matlab e inseguito elaborati tramite Excel.

Tale lavoro è stato fatto per trovare un indicatore che presentasse una correlazione molto forte con il Failure Load ossia che fornisse informazioni più affidabili sullo stato di usura dell'elettrodo rispetto ad utilizzare soltanto l'area di contatto che, ad oggi, risulta l'indicatore di usura più utilizzato.

In seguito, a varie analisi e congiunte con l'utilizzo di un risolutore su Excel è stato trovato un KPI che soddisfa i requisiti richiesti spiegando con una precisione del 65% l'andamento del Failure load (in qualsiasi condizione) e all'83,5% in condizioni di stabilità dell'elettrodo).

Vista la maggiore correlazione tra la qualità del giunto e l'indicatore sviluppato nel presente studio, il monitoraggio di tale KPI, durante il processo di saldatura, può comportare strategie di manutenzione predittiva più efficienti rispetto al monitoraggio della sola area di contatto.

Bibliografia

- [1] J. S. H. Zhang, "Resistance Welding: Fundamentals and Applications" CRC Press Taylor & Francis, 2006.
- [2] Luigi Panza, Manuela De Maddis, Pasquale Russo Spena: "Use of electrode displacement signals for electrode degradation assessment I resistance spot welding" (Journal of Manufacturing Processes 76 2022 93-105)
- [3] Luigi Panza, Giulia Bruno, Manuela De Maddis, Franco Lombardi, Pasquale Russo Spena, Emilio Traini "Data-Drive framework for Electrode Wear Prediction in Resistance Spot Welding"
- [4] Alberto Faveto, Emiliano Traini, Giulia Bruno, Franco Lombardi: "Development of a key performance indicator framework for automated warehouse systems" (2021)
- [5] <https://it.mathworks.com/products/image.html>
- [6] Prof. Michele Lapresa ITIS"E.Fermi" PON G1 FSE 2009-301 "MECCANICA APPLICATA", «Saldatura,» Francavilla Fontana, 2009.
- [7] Filippo Achille Serra – tesi di laurea- Luiss Guido Carli – facoltà di Economia e direzione delle Imprese- "Industria 4.0: la quarta rivoluzione industriale, un'analisi del paradigma attraverso le tecnologie abilitanti e le nuove competenze richieste dal mercato. Il caso Colombini Group spa
- [8] https://it.wikipedia.org/wiki/Industria_4.0
- [9] <https://www.kuka.com/it-it/prodotti-servizi/tecnologie-di-processo/saldatura-continua-a-rulli>
- [10] <https://www.atec-automation.com/it/products/welding/index.php?p=20>